



HAL
open science

Formalisation de la théorie de l' évolution : une approche philosophique et historique

Nicola Bertoldi

► **To cite this version:**

Nicola Bertoldi. Formalisation de la théorie de l' évolution : une approche philosophique et historique. Philosophie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2020. Français. NNT : 2020PA01H214 . tel-03292669

HAL Id: tel-03292669

<https://theses.hal.science/tel-03292669v1>

Submitted on 20 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

pour l'obtention du grade de
docteur en Philosophie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Présentée et soutenue publiquement par

Nicola BERTOLDI

le 30 novembre 2020

La formalisation de la théorie de l'évolution

Une approche historique et philosophique

Composition du jury

Anouk BARBEROUSSE	Professeure à l'Université Paris Sorbonne
Thierry HOQUET	Professeur à l'Université Paris Ouest
Silvia CAIANIELLO	Directrice de Recherches à l'Istituto per la storia del pensiero filosofico e scientifico moderno, CNR
Pierre WAGNER	Professeur à l'Université de Paris 1
Guillaume LECOINTRE	Professeur MNHN au Muséum National d'Histoire Naturelle
Laurent LOISON	Chargé de Recherches au CNRS (IHPST)
Philippe HUNEMAN	Directeur de Recherches au CNRS (IHPST) (directeur de thèse)

**La formalisation de la théorie de
l'évolution**

Une approche historique et philosophique

Nicola BERTOLDI

Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Paris 1 en philosophie

Sous la direction de Philippe Huneman

Table des matières

Introduction générale	1
Première partie : Qu'est-ce qu'un cadre conceptuel ? Les approches formelles de la structure et du contenu des théories scientifiques et la conception « structuraliste » des cadres conceptuels.....	25
Vue d'ensemble sur la première partie	25
Chapitre 1 : La science comme cadre linguistique : de la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne à la conception classique des théories scientifiques	28
1.1 Le <i>Manifeste du Cercle de Vienne</i> et le problème de l'empirisme	33
1.2 Rudolf Carnap et la reconstruction rationnelle du savoir scientifique : de la science comme système de concepts à la science comme langage-système	45
1.2.1 Rudolf Carnap et les deux dogmes de l'empirisme : une approche ontologico-épistémologique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique ?.....	51
1.2.2 La reconstruction rationnelle du savoir au prisme de <i>Die logische Syntax der Sprache</i> : la philosophie comme logique de la science et la science comme système d'énoncés.....	58
1.3 L'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir et le problème de la signification empirique des hypothèses scientifiques : la science comme cadre linguistique	73
1.3.1 La reconstruction rationnelle du principe de l'empirisme et le concept de degré de confirmation comme critère de signification empirique pour les hypothèses incomplètement confirmables.....	83
1.3.2 Le concept de degré de confirmation comme probabilité logique et la construction d'un langage scientifique qui soit empiriquement significatif.....	94

Chapitre 2 : Des sciences formelles aux sciences empiriques ? La conception classique des théories scientifiques comme cadre métalinguistique et le problème de l'extension du programme hilbertien d'axiomatisation des mathématiques..... 114

2.1 Quel langage et quelle ontologie sont-ils nécessaires pour refonder les mathématiques ? Les *Principia Mathematica* et les questions ouvertes du logicisme 121

2.1.1 Jusqu'à quel point peut-on concevoir les mathématiques comme étant des sciences analytiques *a priori* ? Le programme logiciste et les paradoxes de la théorie des ensembles...126

2.1.2 Les objets de la logique symbolique existent-ils vraiment ? Deux interprétations de la solution que Russell et Whitehead ont apportée aux paradoxes de la théorie des ensembles...141

2.2 Le programme formaliste de l'école hilbertienne et la synthèse entre logicisme et intuitionnisme : comment pourrait-on construire un formalisme mathématique universel ? 166

2.2.1 De l'analyse logique des concepts mathématiques aux preuves de consistance des systèmes de formules : le programme formaliste comme cadre métamathématique.....174

2.2.2 La complétude des systèmes formels et l'extension de la méthode axiomatique aux sciences physiques : les limites du programme formaliste.....188

2.3 La conception classique des théories scientifiques : une extension du programme hilbertien d'axiomatisation des mathématiques ? 199

2.3.1 Le principe de tolérance syntaxique et le problème de tolérance sémantique : Rudolf Carnap et la dissolution dialectique des controverses autour des fondements des mathématiques.....206

2.3.2 Qu'est-ce que cela signifie que de comprendre une théorie scientifique ? Le volet sémantique de la conception classique des théories scientifiques comme théorie de l'interprétation partielle des calculs physiques.....225

Chapitre 3 : Distinguer l'analytique du synthétique, séparer la théorie de l'observation : la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel « structuraliste »..... 244

3.1 Comment définir le concept d'« analyticité » en relation aux langages théoriques ? Les limites des postulats de signification et des énoncés de réduction 255

3.1.1 Les postulats de signification face au lien étroit entre le caractère logique des termes théoriques et leur caractère méthodologique : serait-il impossible de définir le concept d'analyticité relativement aux langages des sciences empiriques ?.....	264
3.1.2 Les énoncés de réduction (bilatéraux) comme postulats de signification ? Carl G. Hempel et le problème de la relativité de la signification empirique des énoncés scientifiques.....	278
3.2 Les liens entre la structure syntaxique du langage théorique des sciences empiriques et les critères de signification des termes qui en relèvent : une vision « holiste » de la conception classique des théories scientifiques ?	296
3.2.1 Qu'est-ce qu'un langage théorique ? Le formalisme des langages des sciences empiriques comme théorie (simple) des types et la nature méthodologique de leurs critères de signification.....	303
3.2.2 Le caractère logique des postulats TC comme règles de traduction d'expressions du langage observationnel en expressions du langage théorique et comme schéma de pensée : une vision holiste de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel.....	321
3.3 Les termes théoriques sont-ils indispensables ? Du dilemme du théoricien à une interprétation structuraliste de la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel.....	342
3.3.1 La méthode de Craig et les énoncés de Ramsey : deux procédures effectives pour l'élimination des termes théoriques ?.....	350
3.3.2 Les énoncés de Ramsey et les énoncés de Carnap : une vision dichotomique de la conception classique des théories scientifiques.....	368
3.3.3 L'« opérateur epsilon » et la réduction des termes théoriques : la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel « structuraliste ».....	382

Seconde partie : En quoi la théorie synthétique de l'évolution constitue-t-elle un cadre conceptuel ? Une analyse de la théorie synthétique au carrefour entre la reconstruction formelle et la contextualisation historique.	402
Vue d'ensemble sur la seconde partie	402

Chapitre 1 : De la synthèse évolutive au programme adaptationniste : quel rôle pour les modèles de la génétique théorique des populations dans l'élaboration de la théorie synthétique ? 404

1.1 Quels sont les problèmes qui ont structuré la Synthèse Moderne comme processus historico-institutionnel ? Deux hypothèses historiographiques et épistémologiques 413

1.1.1 Quels liens entre la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution et la théorie synthétique comme cadre conceptuel ? « Assimilation » ou « constriction » ?.....422

1.1.2 Une synthèse « bachelardienne » : la génétique des populations, dite « classique » comme fondement d'une théorie génétique de l'évolution et noyau du cadre conceptuel de la théorie synthétique.....447

1.2 Le durcissement de la Synthèse Moderne et l'émergence du programme adaptationniste : deux facettes du même processus.....471

1.2.1 Le « principe d'isolement fonctionnel » et le « principe d'optimalité » : deux piliers théoriques du programme adaptationniste.....478

1.2.2 La théorie (synthétique) de l'évolution de Theodosius Dobzhansky et de Sewall Wright : un triomphe de l'adaptationnisme ?.....502

Chapitre 2 : La théorie synthétique de l'évolution : une théorie comme les autres ? Les approches axiomatiques de la théorie de l'évolution, entre génétique et physique 536

2.1 Une théorie axiomatique de l'évolution est-elle possible ? Michael Ruse et la conception classique des théories scientifiques 545

2.1.1 Qu'explique vraiment la génétique des populations ?.....552

2.1.2 Le polymorphisme équilibré et le principe de Hardy-Weinberg : une loi de couverture ?.....564

2.2 Jusqu'à quel point la théorie synthétique est-elle une théorie génétique ?..... 575

2.2.1 La conception classique des théories scientifiques et la structure logico-syntaxique de la théorie synthétique.....582

2.2.2 Normes de réaction et normes adaptatives : la théorie synthétique comme cadre conceptuel « géocentrique » ?.....595

2.3 La théorie synthétique de l'évolution : une théorie des forces génétiquement fondée ? 615

2.3.1 Le principe de sélection naturelle est-il un schématisme à caractère nomologique et dynamique ?.....620

2.3.2 L'axiomatisation de Mary B . Williams et de Alexander Rosenberg : la sélection naturelle hors sol génétique ?.....636

Conclusion générale 653

Bibliographie..... 661

Introduction générale

L'analyse et l'élucidation de la manière dont les biologistes recourent à la théorisation dans leur pratique, ainsi que du rôle qu'a joué le concept même de « théorie » dans l'histoire des sciences biologiques constituent une tâche particulièrement ardue, et cela pour trois raisons principales. Premièrement, comme l'observe Massimo Pigliucci (2013), la « biologie théorique » (« *theoretical biology* ») représente une activité très hétérogène, en ceci qu'elle embrasse des domaines d'enquête très diversifiés – qui vont de la biophysique à l'écologie, de la génétique moléculaire à la systématique – et qu'elle fait appel à une pluralité de méthodes d'analyse (Pigliucci 2013)¹. Deuxièmement, la théorisation ne représente qu'un aspect particulier de l'activité des biologistes, complémentaire à l'expérimentation et à l'observation, si bien que faire de la théorie en biologie revient souvent à « vivre deux vies en même temps » (« *living two lives at the same time* ») (Callebaut 2013). Troisièmement, la tendance à l'accumulation d'un vaste « corps de données » empiriques (« *body of data* ») qui a toujours caractérisé la biologie (Beckner 1959)², et que la diffusion de nouvelles technologies visant à extraire, à raffiner et à analyser ces mêmes données – comme, par exemple, les techniques de séquençage des génomes – est en train d'exacerber, a contribué à problématiser la nature même des théories biologiques, ainsi que leur pertinence pour le développement des sciences de la vie (Leonelli 2009, 2012, 2013 ; Callebaut 2012). Comme de tels problèmes sont liés à la nature même de la biologie comme domaine du savoir scientifique et, en conséquence, à la nature même de l'activité des scientifiques qui y travaillent, ils surgissent même lorsqu'on s'intéresse moins à l'activité de théorisation des biologistes, en général, qu'à des théories biologiques particulières. Il en découle que toute tentative d'analyser une théorie biologique, afin de déterminer ce en quoi elle consiste, doit tenir compte de trois questions fondamentales : en quoi telle ou telle théorie est-elle

¹ Plus précisément, Pigliucci (2013) identifie quatre « modalités » de théorisation biologique (« *modalities of theoretical biology* ») distinctes, qui sont la modélisation analytique, la modélisation statistique, la modélisation informatique et l'analyse conceptuelle (Pigliucci 2013, p. 291-294).

² Comme l'observait Morton Beckner (1959), l'un des plus grands obstacles à l'élaboration théorique dans les sciences de la vie a consisté en ceci que « le biologiste se trouve face à bien plus de données qu'il ne peut en gérer [*'more data than he can handle'*], et il n'a pas su se libérer d'un biais [en faveur des aspects physico-chimiques des systèmes qu'il étudie] qu'il voit comme nécessaire pour développer des théories et des méthodes qui lui permettraient de gérer ces mêmes données [*'development of theories and methods that would enable him to handle them'*] » (Beckner 1959, p. 1). La persistance d'un tel biais a également constitué, toujours selon Beckner (1959), l'une des raisons qui ont empêché le développement d'une véritable « manière de penser biologique » (« *biological way of thought* »), ancrée dans une approche « organismique » de la biologie (« *organismic biology* »).

empiriquement fondée, c'est-à-dire ancrée dans les observations et dans les expériences qui nous permettent de caractériser, précisément, les « *explananda* » auxquels s'intéressent les biologistes travaillant dans le domaine empirique en question, c'est-à-dire les phénomènes qu'ils estiment être dignes d'explication au vu du fait qu'ils structurent ce même domaine ? En quoi parvient-elle à mobiliser des « *explanantia* », c'est-à-dire des principes explicatifs, de natures différentes, dans le but de rendre compte d'*explananda* qui sont, eux aussi, de natures différentes ? En quoi nous permet-elle de comprendre les données empiriques que nous livrent les observations et les expériences dont nous venons de parler, c'est-à-dire en quoi nous permet-elle de leur donner une signification en les replaçant dans une conception plus générale du monde biologique ?

De telles questions se posent de manière encore plus brûlante lorsqu'on s'intéresse à la théorie de l'évolution, qui constitue « la seule théorie vaste et véritablement générale en biologie » (« *the only broad, truly general theory in biology* ») (Pigliucci 2013, p. 291), si bien que l'on a pu affirmer que rien n'a de sens en biologie si ce n'est à la lumière de l'évolution (Dobzhansky 1973), voire à la lumière de la génétique des populations (Lynch 2007), et donc des fondements génétiques de l'évolution elle-même. Autrement dit, en quoi la théorie de l'évolution parvient-elle à mobiliser des *explanantia* de natures différentes afin de rendre compte d'un spectre de phénomènes qui va de l'évolution du bec des pinsons de Darwin (Darwin 1839) à celle de l'« évolvabilité » (« *evolvability* ») elle-même, c'est-à-dire de la « capacité [*ability*] qu'ont les systèmes biologiques d'engendrer de la variation phénotypique [*phenotypic variation*] qui est à la fois héritable et adaptative [*heritable and adaptive*] » (Payne & Wagner 2019) ? En quoi est-elle en mesure de mettre en relation la grande masse de données empiriques qui a été accumulée, depuis les premières publications de Darwin (1839, 1859) jusqu'à nos jours, à la suite d'observations et d'expériences de plus en plus raffinées ? En quoi les concepts qui ont été développés dans le cadre de la théorie de l'évolution, et notamment dans le cadre de sa version « synthétique » (Mayr & Provine 1980, 1998), ont-ils permis d'effectuer, justement, une telle synthèse, tout en conservant les composantes essentielles du schéma explicatif qui distinguait la théorie darwinienne originaire de toutes les autres théories de l'évolution avec lesquelles elle était en concurrence au début du XX^e siècle ? La réponse que des partisans d'une « extension » de la Synthèse Moderne (« *Extended Evolutionary Synthesis* ») tels que Laland *et al.* (2014, 2015) ont apporté à ces trois questions consiste à affirmer que la théorie synthétique de l'évolution aurait fini par constituer un cadre conceptuel, fondé sur une synthèse entre l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle, l'approche populationnelle qui était au fondement des modèles statistiques des biométriciens et les principes de l'hérédité mendélienne (Provine 1971, 2001). Le but de la manière de penser l'évolution qui aurait émergé d'une telle synthèse – que Laland *et al.* (2015) qualifient également de « vision standard de l'évolution » (« *standard view of evolution* ») –

consisterait, par conséquent, à mobiliser des *explanantia* issus de ces trois sources conceptuelles et à les organiser en un réseau de principes, qui se fonderait sur les présupposés fondamentaux que nous avons énumérés plus haut. La fonction de ce réseau de principes serait, à son tour, de rendre compte de la masse croissante d'*explananda* que nous livre la recherche dans les sciences de la vie, tout en conservant l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle, et donc, plus généralement, une vision darwinienne du monde vivant. En conséquence, dans une telle perspective, la théorie synthétique de l'évolution constituerait un cadre conceptuel car elle consisterait dans un ensemble de principes dont le but serait d'imposer un certain nombre de contraintes de nature ontologique (c'est-à-dire qui concernent les *explananda* qui structurent le domaine empirique des sciences de l'évolution, et plus généralement des sciences de la vie), de nature épistémologique (c'est-à-dire qui ont trait aux *explanantia* dont se servent les biologistes de l'évolution afin de rendre compte desdits *explananda*) et de nature cognitive (c'est-à-dire qui sont relatives à la vision du monde biologique qui sous-tend les sciences de l'évolution) Mais en quoi consiste, plus précisément, un cadre conceptuel ? Dans quelle mesure peut-on affirmer que la théorie synthétique de l'évolution en est effectivement un ?

Tout comme la question de la croissance du savoir scientifique, le problème de la structure et des fonctions que l'on peut attribuer aux théories, en tant qu'unités constitutives de ce même savoir, n'est nullement spécifique à la philosophie de la biologie. Il s'agit, en effet, d'un questionnement qui a animé toute la réflexion critique sur les fondements des sciences qui s'est amorcée dès le début du XX^e siècle, avec la crise du matérialisme mécaniste – que l'on pourrait caractériser comme étant « un mélange de positivisme comtien, de matérialisme et de mécanisme » (« *a blend of Comtean positivism, materialism and mechanism* ») (Suppe 1977, p. 8) – qui avait largement dominé le discours philosophique tout au long du siècle précédent, nourri par les avancées des sciences expérimentales de l'époque (Rheinberger 2007)³. En conséquence, c'est précisément dans un tel contexte historico-philosophique qu'a surgi et s'est alimentée, au cours du siècle dernier, la question des conditions de possibilité du savoir scientifique telles qu'elles se traduisent par l'élaboration des cadres conceptuels

³ Afin d'étayer cette thèse, Rheinberger (2007, 2014) insiste sur le fait que les processus parallèles d'« historicisation de la philosophie des sciences » (« *Historisierung der Wissenschaftsphilosophie* ») et d'« épistémologisation de l'histoire des sciences » (« *Epistemologisierung der Wissenschaftsgeschichte* ») qui ont contribué à changer la nature des réflexions sur la connaissance scientifique au cours du XX^e siècle ont également entraîné une remise en cause du statut épistémologique des théories scientifiques. C'est ainsi que, pour ne faire qu'un exemple, Otto Neurath (1915) soulignait, en 1915, « que 'de la même façon que nous avons besoin de théories pour classer les choses, nous avons besoin de théories pour classer les théories' [Neurath (1915), p. 63]. Il était convaincu qu'une enquête historique sur les théories scientifiques sur le monde requerrait une métathéorie de ce type qui reposerait sur la comparaison et que ce n'était que de cette façon que cette enquête pourrait se développer en une entreprise pertinente et gratifiante, à laquelle on pourrait attribuer le nom de science » (Rheinberger 2007 ; 2014, p. 26).

dans lesquels s'inscrivent les différentes théories dont se compose ce même savoir. En témoigne, par exemple, la tentative de développer une « conception scientifique du monde » (« *wissenschaftliche Weltauffassung* ») qu'ont menée les membres du Cercle de Vienne (Carnap *et al.* 1929), dont le but était de « relier et d'harmoniser [*in Verbindung und Einklang miteinander zu bringen*] les travaux particuliers des chercheurs dans les différents domaines de la science [*auf den verschiedenen Wissenschaftsgebieten*] » (fussent-ils des domaines des sciences exactes, des sciences naturelles ou des sciences sociales), en établissant « un système formulaire neutre [*neutrales Formelsystem*] », d'un symbolisme purifié des scories des langues historiques », ainsi qu'« un système total de concepts » (« *Gesamtsystem der Begriffe* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 110). Plus précisément, l'on peut affirmer qu'une telle démarche reposait sur trois piliers fondamentaux. Premièrement, en s'inspirant de Ludwig Wittgenstein (1922)⁴, les membres du Cercle de Vienne considéraient que le but de la philosophie ne consistait pas à s'ériger en système de connaissances (« *Systemphilosophie* »), mais à fournir une « clarification logique des concepts, énoncés et méthodes scientifiques » (« *logische Klärung der wissenschaftlichen Begriffe, Sätze und Methoden* »), afin de les purifier de tout contenu métaphysique (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 122). Deuxièmement, en ce qui concerne la logique et les mathématiques, ils rejetaient aussi bien la vision kantienne et néokantienne des vérités formelles comme principes « synthétiques *a priori* »⁵ – c'est-à-dire comme

⁴ « 4.112 – Le but de la philosophie est la clarification logique des pensées [*logical clarification of thoughts*]. La philosophie n'est pas une théorie [*a body of doctrine*] mais une activité [*an activity*]. Une œuvre philosophique se compose essentiellement d'éclaircissements [*elucidations*]. Le résultat de la philosophie n'est pas de produire des 'propositions philosophiques' [*philosophical propositions*], mais de rendre claires les propositions [*the clarification of propositions*]. La philosophie doit rendre claires, et nettement délimitées, les propositions qui autrement sont, pour ainsi dire, troubles et confuses [*cloudy and indistinct*] » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 57).

⁵ Comme l'écrit le philosophe néokantien, appartenant à l'École de Marbourg, Hermann Cohen (1902), « les principes, les postulats fondamentaux [*die Prinzipien, die Grundsätze*], ce sont eux qui n'ont cessé de constituer la problématique [*das Problem*] ; les principes synthétiques [*die synthetischen Grundsätze*], c'est ainsi que Kant les nommait conformément au sens qu'il donnait au mot 'synthétique', furent placés au fondement de la science mathématique de la nature [*der mathematischen Naturwissenschaft zugrunde gelegt*] au terme d'une analyse ouverte, claire et méthodique. Ce sont ces principes qui font de cette discipline savante une science [*Wissenschaft*], et qui en proclament le constant progrès [*den stetigen Fortgang derselben*]. Ce sont des connaissances pures [*die reinen Erkenntnisse*] dont la légitimité et l'acquisition avaient été depuis fort longtemps pressenties, affirmées et défendues par la raison spéculative. Ils étaient désormais sertis dans un système clos [*in einem geschlossenen System*], à titre de présupposés productifs [*als fruchtbare Voraussetzungen*]. Le travail de la métaphysique [*Die Arbeit der Metaphysik*] n'était alors pas encore accompli, mais il pouvait désormais débiter sur un terrain déblayé. La philosophie, devenue critique, était capable et se devait de prendre un nouveau départ [*Die Philosophie konnte und sollte, als Kritik, einen neuen Anfang nehmen*] » (Cohen 1902 ; Cohen *et al.* 2000, p. 55).

principes de la connaissance qui ne se réduiraient pas au simple déploiement du contenu d'un concept donné, mais qui ne seraient pas pour autant issus de l'expérience empirique – que « l'ancien empirisme [*'der ältere Empirismus'*] (par exemple [John Stuart] Mill) qui a voulu dériver la mathématique et la logique en quelque sorte expérimentalement et inductivement [*'experimentell-induktiv ableiten'*] ». C'est ainsi que, à ces deux orientations du passé, les membres du Cercle de Vienne opposaient « la conception du caractère tautologique [et donc purement analytique] de la mathématique [*'die Auffassung vom tautologischen Charakter der Mathematik'*] qui repose sur les recherches de Russell et Wittgenstein » (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 116). Troisièmement, en ce qui concerne les sciences naturelles et sociales (et notamment les sciences physiques), l'objectif qu'ils s'étaient fixé consistait à mener à bien, « grâce à l'application de la méthode axiomatique » (« *durch die Anwendung der axiomatischen Methode* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 116), le programme de réduction de toute connaissance aux phénomènes empiriques qu'avait esquissé Ernst Mach (1883, 1886, 1905)⁶. L'on peut donc en conclure que, d'après la conception scientifique du monde que prônaient les membres du Cercle de Vienne, les conditions de possibilité d'un savoir scientifique clair et distinct consisteraient dans une triple réduction : « la réduction de la philosophie à une théorie de la connaissance », et plus précisément à une analyse logique du langage, la réduction des mathématiques à des vérités logiques, de nature purement analytique, et la réduction des sciences naturelles et sociales à leurs fondements empiriques (Ouelbani 2006, p. 15-16 ; Dahms 1985). Il en découle que la conception de la science qui était propre au Cercle de Vienne, et qui a été ensuite développée dans le cadre de la tradition de l'empirisme logique⁷, représente une possible réponse à

⁶ Comme l'a observé Jan Sebestik (2010), « phénoménisme, instrumentalisme, rejet de la métaphysique, conception unitaire de la science [comme conséquence de l'unité des sensations qui en constituent le fondement], voilà l'héritage que lègue à ses successeurs celui qui fut, selon la parole de Philipp Frank [(1917)], 'le vrai maître du Cercle de Vienne' » (Sebestik 2010, p. 91). Il faut tout de même rappeler que l'adhésion des tenants du Cercle de Vienne aux positions de Mach (1883, 1886, 1905) n'était pas acritique. Comme le remarque Thomas Uebel (1996), Frank (1941) lui-même estimait que « le réductionnisme de [la] théorie des éléments [de Mach] » (« *the reductionism of his theory of elements* ») était intenable du fait qu'il faisait l'impasse des problèmes logiques qu'avait comportés la mathématisation de la physique (Uebel 1996, p. 96).

⁷ Comme l'observe Mélika Ouelbani (2006), en reprenant à son compte la périodisation esquissée par H. J. Dahms (1985), il est possible d'identifier cinq périodes dans l'histoire du Cercle de Vienne. La première période (1907-1928) correspond à la « préhistoire du Cercle de Vienne », alors que la seconde correspond à « une période de construction du Cercle et coïncide avec l'arrivée de [Hans] Hahn et [Moritz] Schlick à Vienne ». La troisième période (1928-1934), que l'on peut considérer comme ayant été « l'âge d'or » du Cercle, s'est caractérisée, en revanche, par la publication du Manifeste (Carnap *et al.* 1929), par la parution de la revue *Erkenntnis* et par un grand nombre de débats fondateurs sur la nature du langage des sciences ou sur les fondements empiriques de la connaissance. La quatrième (1934-1938) et la cinquième période (après 1938) correspondent, en conclusion, à un triple mouvement d'« internationalisation » du Cercle de Vienne,

la question de savoir en quoi pourraient consister, concrètement, les cadres au sein desquels se produit la croissance du savoir scientifique et se structurent les théories dont se compose ce dernier. Cela dit, pour quelles raisons une telle réponse serait-elle pertinente pour comprendre en quoi consiste la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel ?

La pertinence de la conception positiviste, ou empiriste-logiciste, de la science, ainsi que des cadres conceptuels qui la structurent, pour la compréhension de la théorie synthétique de l'évolution réside dans le rôle qu'a joué le Mouvement pour l'unité de la science (*Movement for the Unity of Science*) dans le processus qui a abouti à une telle synthèse (Smocovitis 1992, 1996). Ce mouvement n'était, en effet, rien d'autre qu'un développement ultérieur du programme empiriste-logiciste de constitution d'un système unifié des concepts scientifiques, qui avait été initié, vers la fin des années 1920, par des membres, ou du moins des proches, du Cercle de Vienne, tels qu'Otto Neurath, Rudolf Carnap et le linguiste américain Charles Morris. Son importance a consisté moins dans l'élaboration effective d'un cadre conceptuel, commun aux différents domaines d'où provenaient les scientifiques qui y ont participé, que dans le fait qu'il a été à l'origine d'un grand nombre d'initiatives qui ont fini par créer une sorte d'« *ethos* » partagé, habité par une tension vers l'unification du savoir scientifique : pour ne faire que quelques exemples, l'on peut rappeler les différents Congrès internationaux pour l'unité de la science (*International Congresses for the Unity of Science*), et notamment le congrès consacré au concept de causalité dans les sciences physiques et biologiques qui s'est tenu à Copenhague, en 1936, ou encore la publication de la revue « *Erkenntnis* », à partir de 1930, le lancement d'une collection de monographies, intitulée « *International Encyclopedia of Unified Science* » (« *Encyclopédie internationale de la science unifiée* »), en 1938, et la fondation d'un *Institut pour l'unité de la science* (*Unity of Science Institute*) en 1936 (Smocovitis 1992, 1996 ; Wolters 1999, 2018 ; Cat 2017). C'est précisément par l'intermédiaire de ces initiatives que le Mouvement pour l'unité de la science a fini par impliquer quelques-uns des « architectes » (« *architects* ») de la Synthèse Moderne, et tout particulièrement Joseph Henry Woodger (1924, 1929a, 1929b, 1937, 1939, 1952) – qui a fini par publier un ouvrage dans l'*International*

grâce, notamment, aux congrès internationaux » organisés à Prague, à Paris, à Königsberg, etc., de dissolution progressive de ce même groupe, « à cause de l'annexion de l'Autriche par l'Allemagne nazie, qui s'est soldée par l'émigration » d'un grand nombre de ses membres, ainsi que par l'assassinat de Moritz Schlick en 1936, et de postérité du programme philosophique que ces derniers avaient contribué à élaborer, grâce à l'influence qu'il a exercé sur le développement de la philosophie contemporaine, notamment, mais non exclusivement, sur celui de la philosophie analytique (Ouelbani 2006, p. 9-10). Dans cette thèse, lorsque nous utilisons le terme « Cercle de Vienne », nous faisons référence aux trois premières périodes, tandis que, lorsque nous utilisons le terme « empirisme logique », nous nous référons plutôt aux deux périodes conclusives.

Encyclopedia of Unified Science, intitulé « *The Technique of Theory Construction* » (« *La technique de construction des théories* ») (Woodger 1939)⁸ – ou J. B. S. Haldane (1932, 1936) – qui présenta, en 1936, un extrait de ses travaux sur les causes de l'évolution (Haldane 1932) au congrès de Copenhague (Smocovitis 1992, 1996 ; Wolters 1999, 2018). Une telle implication ne s'est, néanmoins, pas traduite par une influence directe et, pour ainsi dire, « constructive » sur les débats qui ont amené à la résolution (du moins apparente) des différends qui empêchaient l'unification des sciences du vivant sous l'égide de la théorie darwinienne de l'évolution. L'une des raisons principales en est que l'intérêt des membres du Cercle de Vienne pour les sciences du vivant se limitait à deux « directions de problèmes » (« *Problemrichtungen* ») particulières, à savoir le dépassement du « vitalisme » (« *Vitalismus* »), en tant que doctrine métaphysique, et la critique de l'antiréductionnisme, en tant que position scientifique (Carnap *et al.* 1929 ; Smocovitis 1992, 1996 ; Wolters 1999, 2018)⁹, alors que, comme l'observe Ernst Mayr (1993) lui-même dans une réponse aux remarques que Vassiliki B. Smocovitis (1992) a pu faire à ce sujet, les « constructeurs de ponts » (« *bridge builders* ») qui ont œuvré pour combler le gouffre entre les différentes disciplines concernées par la Synthèse Moderne tâchaient, justement, de tracer une voie moyenne entre le réductionnisme physicaliste¹⁰ et le vitalisme (Mayr 1993, p. 31-32)¹¹. Par conséquent, en quoi

⁸ Malgré J. H. Woodger ait également entretenu des relations épistolaires étroites avec Karl Popper, Willard Van Orman Quine ou Alfred Tarski (dont il a édité, en 1956, le premier recueil d'ouvrages traduits en anglais), la nature de son implication dans le courant de l'empirisme logique fait débat. Pour des analyses qui mettent en valeur une telle implication, voir Joergensen (1970), Smocovitis (1992, 2000) et Wolters (1999, 2018), alors que, pour des interprétations qui la remettent en question, voir Nicholson et Gawne (2014, 2015).

⁹ « Les métaphysiciens ont toujours aimé faire de la biologie un domaine privilégié, attitude qui s'est exprimée dans la doctrine d'une force vitale spécifique [*in der Lehre von einer besonderen Lebenskraft*]: la doctrine du vitalisme...Cependant, si l'on extrait de ce vitalisme métaphysique le noyau qui est empiriquement saisissable [*der empirisch faßbare Kern*], il reste la thèse que les processus de la nature organique se déroulent selon des lois qui ne se laissent pas réduire à des lois physiques [*die These..., daß die Vorgänge in der organischen Natur nach Gesetzen verlaufen, die sich nicht auf physikalische Gesetze zurückführen lassen*]. Or, une analyse plus précise montre que cette thèse équivaut à affirmer que certains domaines du réel ne seraient pas soumis à l'emprise d'une légalité uniforme et complète [*die Behauptung, gewisse Gebiete der Wirklichkeit unterständen nicht einer einheitlichen und durchgreifenden Gesetzmäßigkeit*] » (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 120).

¹⁰ Par « physicalisme » (« *physicalism* »), Mayr (1982, 1993, 2004) entendait une conception de la science qui ne serait rien d'autre qu'une généralisation, à toutes les disciplines qui la composent, des caractéristiques propres à la physique, et notamment à la mécanique, comme, par exemple, le rôle prépondérant de la formalisation mathématique. Plus précisément, il faisait remonter une telle conception de la science aux œuvres de Galilée (1632), de Newton (1687) et de Kant (1786) (Mayr 2004, p. 13).

¹¹ « En fait, les constructeurs de ponts ont été à même d'établir des connexions entre les différents domaines des sciences de la vie en pointant du doigt l'insuffisance d'une biologie purement expérimentale [*the insufficiency of a purely*

pourrait-on affirmer que le Mouvement pour l'unité de la science, et donc également le Cercle de Vienne auraient joué un certain rôle dans l'élaboration de la Synthèse Moderne ?

C'est précisément afin de répondre à une telle question que Smocovitis (1996) a insisté sur le fait que, bien que les architectes de la théorie synthétique de l'évolution aient exagéré les résultats qu'ils avaient obtenus en vue de l'unification des sciences de la vie – comme a fini par le reconnaître Mayr (1993) lui-même¹² –, il n'en demeure pas moins vrai qu'ils étaient tous animés par « la croyance tacite » (« *the tacit belief* ») que l'unification théorique constituerait le but ultime de la science, en général, et des sciences de la vie, en particulier. C'est précisément sur la base d'une telle croyance partagée que les architectes de la Synthèse Moderne avaient pu en conclure qu'il était possible d'« aplanir les différends » (« *straighten out the differences* ») qui les opposaient par « la recherche d'un terrain commun » (« *the search for a common ground* »), et notamment par celle d'« un langage universel partagé » (« *a shared universal language* ») (Smocovitis 1996, p. 202). Autrement dit, d'après Smocovitis (1992, 1996), les architectes de la Synthèse Moderne se seraient engagés dans un processus d'unification de la biologie non pas parce qu'ils partageaient un corps de principes théoriques et de connaissances factuelles, mais parce qu'ils adhéraient, en tant qu'« acteurs historiques » (« *historical actors* »), au même « cadre épistémique constitué de manière narrative (ou discursivement fondé) » (« *a narrative-constituted (or discursively based) epistemic framework* »), ce qui les motivait, ainsi, à coopérer (Smocovitis 1996, p. 206). Il se trouve, en outre, que le récit (« *narrative* ») (Smocovitis 1996) qui structurait un tel cadre n'était rien d'autre que l'idée de la quête d'un savoir scientifique unifiée, fondé sur de solides bases empiriques et purifié de tout présupposé métaphysique qui était au cœur du Mouvement pour l'unité de la science et que ce dernier avait

experimental biology'] et en montrant l'échec de l'approche strictement réductionniste qu'adoptaient les physicalistes dans la résolution de tous les problèmes qui se posent aux niveaux supérieurs de l'intégration biologique ['*the failure of the strictly reductionist approach of the physicalists to solve any of the problems at the higher levels of biological integration*'] » (Mayr 1993, p. 31-32).

¹² « Les historiens (peut-être même Mayr et Provine) ont exagéré ['*overemphasized*'] l'unité qui a été réalisée par la synthèse » (Mayr 1993, p. 32). Par exemple, poursuivait Mayr (1993), « les différences entre les biologistes expérimentales [notamment les généticiens] et les naturalistes ['*the differences between the experimentalists and naturalists*'] ont été grandement réduites, mais l'honnêteté nous oblige à admettre qu'il subsistait tout de même des différences flagrantes ['*conspicuous differences still remained*'] », en ceci que les premiers continuaient à regarder l'évolution comme étant « un changement de fréquences géniques » (« *a change of gene frequencies* »), et donc à considérer le gène comme étant « la cible de la sélection naturelle » (« *the target of selection* »), alors que les seconds estimaient que l'évolution consisterait en « une série de processus qui ont pour résultat l'adaptivité et la diversité [des systèmes biologiques] » (« *a series of processes resulting in adaptedness and diversity* »), si bien qu'ils considéraient l'« individu » (« *individual* ») comme étant la cible de la sélection naturelle (Mayr 1993, p. 32).

empruntée, à son tour, à la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne. En conséquence, sans qu'il soit nécessaire que nous adhérions à la conception, pour ainsi dire, « herméneutique » de la science comme « expression d'un désir de comprendre et de formuler, dans le cadre de la pensée occidentale, une vision du monde qui soit douée de sens » (« *an expression of a desire to understand and formulate a meaningful worldview within the Western way of thought* ») (Smocovitis 1996, p. 11) que prône Smocovitis (1996), nous pouvons, tout de même, tirer profit des arguments qu'a développés cette dernière. Plus précisément, nous pouvons nous en servir pour avancer l'hypothèse que la conception scientifique du monde caractéristique du Cercle de Vienne, ainsi que du courant de l'empirisme logique, aurait fini par structurer, quoique de manière indirecte, la Synthèse Moderne en tant que processus historique. À partir de ce présupposé, nous pouvons donc en conclure que, si nous cherchons à donner une définition de ce qu'est un cadre conceptuel qui pourrait nous permettre d'explicitier en quoi consiste la théorie synthétique de l'évolution (justement, en tant que cadre conceptuel), il est tout à fait pertinent que nous tâchions de la formuler sur la base de la conception scientifique du monde qui était propre au Cercle de Vienne. Cela dit, en quoi consiste la vision de la science, en tant que corps de connaissances, que l'on pourrait déduire d'une telle conception ? En quoi une telle conception de la science se traduirait-elle par une théorie des théories scientifiques ? Et en quoi cette théorie des théories scientifiques pourrait servir de fondement pour une définition de ce qu'est un cadre conceptuel ?

Dans cette thèse, nous avancerons donc l'idée que la pertinence de la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne, ainsi qu'au courant de l'empirisme logique, pour la compréhension de la théorie synthétique de l'évolution résiderait dans le fait qu'elle avait contribué à forger l'*ethos* qui a animé les architectes d'une telle synthèse. C'est précisément cet *ethos* qui les aurait, en quelque sorte, persuadés de la possibilité de parvenir à l'unification des sciences de la vie (Smocovitis 1992, 1996), bien que les débats qui avaient suivi la publication de l'*Origine des espèces* (Darwin 1859) se fussent accompagnés d'« une séparation croissante » (« *an increasing separation* ») entre les différentes disciplines biologiques (Mayr 1998a)¹³. En conséquence, nous nous appuyerons

¹³ « L'émergence de l'évolutionnisme [*the rise of evolutionism*] après 1859 a coïncidé avec une séparation croissante de la zoologie et de la botanique en de nouveaux champs disciplinaires [*new special fields*], tels que l'embryologie, la cytologie, la génétique, la biologie comportementale et l'écologie. Simultanément, le clivage [*gap*] entre les biologistes expérimentaux et ces anatomistes, zoologistes, botanistes et paléontologues qui avaient été formés au point de vue naturaliste [*raised as naturalists*], et qui travaillaient avec des organismes entiers [*whole organisms*], s'est accru. Non seulement chacun de ces groupes s'intéressait à des objets d'étude différents, mais il posait également des questions fondamentalement différentes [*basically different questions*]. Lorsqu'il était question d'interpréter les phénomènes évolutifs [*the interpretation of evolutionary phenomena*], leurs conclusions étaient souvent diamétralement opposées » (Mayr 1998a, p. 6).

sur un tel présupposé afin d'en conclure qu'il serait tout à fait justifié de répondre à la question de savoir en quoi la théorie synthétique de l'évolution constituerait un véritable cadre conceptuel en tâchant de dégager une définition de la notion même de « cadre conceptuel » qui s'inscrit, justement, dans la tradition de l'empirisme logique. Comme nous l'avons déjà évoqué, cette supposition n'est, cependant, pas anodine, puisque rien ne témoigne d'une possible influence directe des thèses empiristes et positivistes – comme, par exemple, les trois thèses, énoncées par Kuhn (1970a), que nous avons mentionnées plus haut – sur l'élaboration de la Synthèse Moderne. Bien au contraire, si l'on se penche sur la manière dont des architectes de la théorie synthétique tels qu'Ernst Mayr (1961, 1982, 1985, 1993, 1995, 2004), Theodosius Dobzhansky (1955, 1956, 1964, 1965, 1968, 1969 ; Ayala & Dobzhansky 1974) et George Gaylord Simpson (1949, 1950a, 1962, 1963, 1964, 1967, 1974) ont essayé de déceler et de conceptualiser les implications épistémologiques, éthiques, voire métaphysiques de leurs propres contributions au développement de la pensée évolutive (Delisle 2009) – et donc, par ce même biais, à l'unification de la biologie –, on peut remarquer que ces derniers manifestaient une certaine résistance, si ce n'était une hostilité ouverte, à l'égard de ce que l'on pourrait appeler, en empruntant les mots mêmes de Mayr (1982, 2004), la forme particulière de « réductionnisme physicaliste » (« *physicalist reductionism* ») qui constituait, comme nous l'avons déjà remarqué, l'une des « directions de problèmes » fondamentales de l'empirisme logique dans le domaine des sciences de la vie (Carnap *et al.* 1929). Il est, toutefois, nécessaire de nuancer le propos que nous venons de tenir, en remarquant que ces trois auteurs s'accordaient tous pour accepter le présupposé même d'une telle forme de réductionnisme physicaliste, c'est-à-dire la thèse d'après laquelle la « composition matérielle » (« *material composition* ») (Mayr 1982, p. 60) de tous les phénomènes biologiques (« entité, événement, processus, etc. ») (« *entity, event, process, etc.* ») (Callebaut 1995, p. 37) serait la même que celle des phénomènes physico-chimiques, si bien que les premiers ne seraient pas seulement compatibles avec les seconds, mais en constitueraient une espèce particulière. Il s'agit, en effet, d'une thèse qui permettait aux biologistes engagés dans la synthèse de se démarquer de toute conception « vitaliste » (« *Vitalismus* », « *vitalism* ») du monde organique, et que Mayr (1982) qualifiait, encore une fois, de « réductionnisme (physicaliste) constitutif » (« *constitutive reductionism* »), dans le but de la distinguer de deux autres formes de réductionnisme, à savoir ce qu'on appelle communément le « réductionnisme (physicaliste) explicatif » (« *explanatory reductionism* ») et le « réductionnisme (physicaliste) théorique » (« *theory reductionism* ») (Mayr 1982, p. 60-62 ; Callebaut 1995, p. 37), auxquelles les architectes de la théorie synthétique étaient tous, quoique à différents degrés, opposés. C'est précisément en analysant ces autres aspects du concept même de « réductionnisme » que l'on peut donc comprendre les tenants et les aboutissants des différends qui opposaient Mayr (1961, 1982, 1985, 1993, 1995, 2004),

Dobzhansky (1955, 1956, 1964, 1965, 1968, 1969 ; Ayala & Dobzhansky 1974) et Simpson (1949, 1950a, 1962, 1963, 1964, 1967, 1974), d'une part, aux empiristes logiques, d'autre part.

Ces autres formes de réductionnisme constituent, en effet, autant d'éléments constitutifs du réductionnisme physicaliste que l'on peut attribuer, justement, au courant de l'empirisme logique, comme en témoignent les analyses qu'Ernest Nagel (1961, 1977) a consacrées à de telles notions. Plus précisément, lorsqu'on s'intéresse aux rapports entre biologie et sciences physico-chimiques, l'on peut définir la thèse du réductionnisme explicatif comme consistant à affirmer qu'il serait possible de rendre compte de tous les phénomènes biologiques, peu importe quel soit leur « niveau hiérarchique d'intégration » (« *hierarchical level of integration* ») (Mayr 1982, p. 60), en fonction des propriétés de leurs parties composantes, ainsi que de la manière dont interagissent ces dernières. Pour ne faire qu'un exemple, l'on peut identifier, justement, une expression de cette thèse dans la manière dont Nagel (1961, 1977) a lui-même tâché, par le biais d'une « vision des processus orientés vers un but comme étant des propriétés de systèmes » (« *'system-property' view of goal-directed processes* ») (Nagel 1977, p. 285)¹⁴, de reconduire les « explications fonctionnelles et téléologiques » (« *functional or teleological explanations* ») des biologistes aux modèles explicatifs « (nomologico-)déductifs » (« *deductive model* ») ou « probabilistes » (« *probabilistic explanations* ») dont se servaient les empiristes logiques pour caractériser les « schèmes d'explication » (« *explanatory patterns* ») propres aux autres branches des sciences naturelles (Nagel 1961, p. 21-25), et notamment aux sciences physiques. Quant au réductionnisme théorique, toujours en relation au statut

¹⁴ Plus précisément, d'après une telle vision, l'« orientation vers un but » (« *goal-directedness* »), et donc la « téléologie » (« *teleology* »), serait, justement, une propriété caractéristique des systèmes naturels, et notamment des systèmes biologiques. C'est pourquoi, afin d'éclaircir ce point, Nagel (1977) mentionnait, comme exemple de processus téléologique, le mécanisme homéostatique qui permet de maintenir la concentration de l'eau dans le sang à un niveau constant qui est égal à 90%. En effet, si l'on accepte une définition des processus téléologiques comme propriétés de systèmes qui se comportent d'une certaine manière, l'on peut expliquer le fonctionnement des reins en affirmant que ce dernier consisterait à retirer de la circulation sanguine une certaine quantité d'eau, *K*, précisément dans le but de maintenir la concentration de l'eau dans le sang à un taux cible constant de 90%, *G*. Pour que l'on puisse affirmer cela, il faut, cependant, que, « pour chaque membre d'une suite de valeurs possibles (dans certaines limites) [*'a sequence of possible values (within certain limits)'*] du contenu en eau du sang, il existe un membre de la séquence des valeurs possibles de *K* qui soit tel que, pour chaque paire de valeurs de ces deux suites numériques, il *soit possible* d'atteindre des valeurs correspondantes du but *G* [*'such that for each pair of these corresponding values of the goal G would be achieved'*] » (Nagel 1977, p. 287). En termes physiologiques, cela signifie que l'on peut attribuer aux reins le « but » (« *goal* ») de stabiliser la concentration de l'eau dans le sang à la condition, pour ainsi dire, « contrefactuelle » que, « au cas où le sang *serait* irroré d'eau à un niveau qui serait supérieur ou inférieur à celui que l'on observe dans les faits, l'activité des reins...*ait été* modifiée de manière correspondante » (« *were the blood inundated with water to a greater or lesser extent than was actually the case, the activity of the kidneys...would have been appropriately modified* ») (Nagel 1977, p. 287).

épistémologique des sciences biologiques, il s'agit de la thèse d'après laquelle, en tant que corps de connaissances, ces dernières seraient, plus ou moins complètement, réductibles aux sciences physico-chimiques, où, par « réduction théorique » (« *theory reduction* »), l'on entend, d'après la définition que Nagel (1961) a lui-même donnée d'un tel concept et qui a été reprise à la fois par Dobzhansky (1964, 1968, 1969) et par Mayr (1982, 2004), « l'explication [*'explication'*] d'une théorie ou d'un ensemble de lois expérimentales [*'a set of experimental laws'*] qui relèvent d'un certain domaine de recherche par le biais d'une théorie qui a été normalement, mais non invariablement, formulée [*'usually though not invariably formulated'*] pour rendre compte d'un autre domaine » (Nagel 1961, p. 338). Encore une fois, c'est dans les écrits de Nagel (1961) que nous pouvons trouver une exemplification de cet autre aspect du réductionnisme physicaliste, et notamment dans les paragraphes que ce dernier a consacrés à la question de savoir en quoi consistent les conditions de possibilité d'un « programme mécaniste en biologie » (« *mechanistic program in biology* ») (Nagel 1961, p. 438), c'est-à-dire d'une orientation épistémologique qui viserait, justement, à expliquer les lois qui semblent caractériser les phénomènes vitaux en termes de lois et de théories physico-chimiques. Par conséquent, c'est précisément en opposition à une telle orientation que les architectes de la Synthèse Moderne ont tâché de systématiser, pour ainsi dire, « rétrospectivement » les fondements philosophiques du cadre conceptuels qu'ils avaient eux-mêmes contribué à établir.

Dobzhansky (1964, 1968, 1969) adoptait, par exemple, une attitude envers le réductionnisme physicaliste des empiristes logiques, et notamment de Nagel (1961), que l'on pourrait qualifier de « conciliatrice », en ceci qu'il était prêt non seulement à reconnaître toutes les subtilités des critiques que les partisans d'une telle forme de réductionnisme adressaient à l'idée même que la biologie puisse se constituer en science épistémologiquement autonome, mais également à leur concéder des arguments (Delisle 2009). Plus précisément, il faisait la distinction entre deux points de vue qu'il considérait comme étant autant de faces complémentaires d'une seule et même réalité biologique, ainsi que d'une seule et même science unifiée du vivant : d'une part, un point de vue « cartésien ou réductionniste » (« *Cartesian or reductionist* ») (Dobzhansky 1968, p. 1), qui consisterait à décomposer les phénomènes biologiques, en tant que « phénomènes complexes » (« *complex phenomena* »), en leurs « constituants les plus simples » (« *simplest components* »), et donc à réduire, par ce même biais, les lois, les explications et les théories biologiques aux lois, aux explications et aux théories « mécaniques, physiques et chimiques » (« *mechanical, physical and chemical* ») (Dobzhansky 1968, p. 2) qui ont pour objets ces mêmes constituants élémentaires, en montrant en quoi l'on pourrait considérer les premières comme n'étant rien d'autre que des « cas de figure particuliers » (« *special cases* ») des secondes (Dobzhansky 1969, p. 166) ; d'autre part, un point de vue « darwinien ou compositionnel » (« *Darwinian or compositionist* ») (Dobzhansky 1968, p. 1),

qui s'opposerait, justement, au double réductionnisme, explicatif et théorique, qu'incarnerait le point de vue cartésien en ceci qu'il viserait à rendre compte des phénomènes biologiques en les considérant comme étant des « totalités fonctionnelles » (« *functioning wholes* ») (Dobzhansky 1969, p. 166) dont le fonctionnement complexe ne saurait s'expliquer par les seuls effets d'interactions entre parties composantes qui s'additionneraient les unes aux autres. D'un point de vue compositionnel, ce comportement serait, en conséquence, la conséquence de deux propriétés fondamentales des traits biologiques, à savoir leur « utilité adaptative » (« *adaptive usefulness* ») (Dobzhansky 1969, p. 167) pour les organismes qui les possèdent, c'est-à-dire la contribution causale qu'ils apportent à la détermination des probabilités que les organismes en question parviennent à survivre et à se reproduire dans les conditions environnementales données¹⁵, ainsi que la « fonction écologique » (« *ecological function* ») que remplit tel ou tel trait « au sein des communautés » (« *in the communities* ») où vivent les organismes qui le possèdent (Simpson 1964, cité par Dobzhansky 1968, p. 2 ; 1969, p. 167). En reconnaissant la complémentarité de ces deux points de vue, Dobzhansky (1968, 1969) visait ainsi à tracer une voie moyenne entre « vitalisme » et « mécanisme », dans le but de dissoudre « la controverse banale et pénible » qui les avait souvent opposés (« *the banal and wearisome vitalism-mechanism controversy* ») (Dobzhansky 1969, p. 165)¹⁶ et de poser, par ce même

¹⁵ Il est intéressant de remarquer que Dobzhansky (1969) distinguait le concept d'utilité adaptative du concept de « valeur adaptative » (« *adaptive value* »), ou « *fitness* darwinienne » (« *Darwinian fitness* ») (Dobzhansky 1969, p. 172). Le premier était, à ses yeux, un concept, pour ainsi dire, « écologique », en ceci qu'il l'envisageait comme étant une mesure de la contribution que telle ou telle caractéristique apporte au succès, défini en termes de probabilités de survie et de reproduction, des organismes qui la possèdent dans le contexte d'un certain réseau d'interactions qui sont, justement, de nature écologique. Quant au second, Dobzhansky (1969) précisait qu'il s'agirait d'une mesure du « taux de transmission des gènes d'une génération à l'autre » (« *the rate of transmission of genes from generation to generation* »), et donc de « l'efficacité reproductive d'un génotype donné » (« *the reproductiv effectiveness of a genotype* »), que l'on pourrait définir, « d'un point de vue opérationnel » (« *operationally* ») comme étant « la contribution moyenne que les porteurs d'un certain génotype, ou d'une certaine classe de génotypes, apportent au *pool* génétique [ou *pool* génique] de la génération successive relativement à la contribution d'autres génotypes » (« *the average contribution which the carriers of a genotype, or of a class of genotypes, make to the gene pool of the following generation relative to the contribution of other genotypes* ») (Dobzhansky 1969, p. 173)

¹⁶ Il faut préciser que, en cela, Dobzhansky (1968, 1969) suivait une suggestion d'Ernest Nagel (1961) lui-même, qu'il citait explicitement : « C'est une erreur que de présumer que la seule alternative au vitalisme est le mécanisme [*It is a mistake to suppose that the sole alternative to vitalism is mechanism*']. Il y a des secteurs de la recherche biologique [*sectors of biological inquiry*'] dans lesquels les explications physico-chimiques [*physico-chemical explanations*'] ne jouent, à présent, qu'un moindre rôle, voire aucun, et l'on a pu exploiter un certain nombre de théories biologiques qui ne sont pas de caractère physico-chimique [*not physicochemical in character*']. Par exemple, on a à disposition un corps impressionnant de connaissances expérimentales qui concernent les processus embryologiques [*an impressive body of experimental knowledge concerning embryological processes*'], bien que peu d'entre les régularités qui ont été

biais, les jalons pour la compréhension des « multiples niveaux d'intégration structurelle et fonctionnelle, hiérarchiquement enchevêtrés » (« *several hierarchically superimposed levels of integrations of structures and functions* ») qui caractérisent le vivant, à savoir le niveau moléculaire, le niveau cellulaire, le niveau des individus, celui des populations, ainsi que celui des communautés et des écosystèmes (Dobzhansky 1969, p. 170). Dobzhansky (1968, 1969) estimait, en effet, que, si le point de vue cartésien ou réductionniste était nécessaire afin que l'on puisse conceptualiser la manière dont s'opère et se maintient l'intégration verticale de ces différents niveaux d'organisation, le point de vue darwinien ou compositionnel était également indispensable afin que l'on puisse rendre compte des structures et des processus qui rendent possible l'intégration horizontale de ces mêmes niveaux d'organisation, et qui ne seraient, à son avis, rien d'autre que des « trames d'éléments constitutifs qui appartiennent aux niveaux sous-jacents » (« *patterns of components belonging to the underlying levels* ») (Dobzhansky 1969, p. 171). Par conséquent, c'est précisément dans un tel sens que Dobzhansky (1968, 1969) considérait ces deux points de vue comme étant complémentaires, c'est-à-dire en tant que « principes d'unification » (« *unifying principles* ») (Dobzhansky 1969, p. 178) et d'intégration de nos connaissances au sujet des différents niveaux d'organisation du vivant.

Quant à Ernst Mayr (1982), comme nous l'avons anticipé plus haut, l'attitude qu'adoptait ce dernier face à la tradition philosophique de l'empirisme logique était beaucoup plus dure, à tel point qu'il allait jusqu'à minimiser les contributions que les philosophes de la « génération plus ancienne » (« *older generation* »), tels que « Cassirer, Popper, Russell, Bloch, Bunge, Hempel et [, justement,] Nagel », avaient apportées au développement de la philosophie de la biologie (Mayr 1982, p. 75). Plus précisément, Mayr (1982, 1995, 2004) les accusait d'avoir voulu appliquer à l'épistémologie des sciences de la vie les « principes » (« *tenets* ») (Mayr 1995) d'une conception du savoir scientifique qui était modelée sur la mécanique classique et qui tendait à prêter aux autres disciplines scientifiques des caractéristiques épistémiques que Mayr (1982, 1995, 2004) considérait comme étant spécifiques à cette dernière. En conséquence, c'est dans le contexte d'une telle « épistémologie physicaliste » (Delisle 2009) – qu'il faisait remonter jusqu'à Galilée (1632), à Newton (1687) et à Kant (1786), que Mayr (1982, 1995, 2004) situait le réductionnisme explicatif et théorique que prônait des empiristes logiques tels que Nagel (1961, 1977) – ou, du moins, dont ils défendaient la possibilité – vis-à-vis des sciences de la vie¹⁷. Dans un ouvrage consacré à ce qui rend la biologie une science « unique

découvertes dans ce domaine soient, à présent, explicables en des termes exclusivement physico-chimiques » (Nagel 1961, p. 431).

¹⁷ Comme le rappelle Richard Delisle (2009), Mayr (1995) résumait le cadre de l'épistémologie physicaliste à « six propositions », qui sont donc les suivantes : 1) « Les lois universelles sont les causes de tous les phénomènes et processus ». 2) « Tous les processus sont rigoureusement déterminés (Laplace). Par conséquent, il est possible de prévoir

dans son genre » (« *unique* »), Ernst Mayr (2004) critique, ainsi, le réductionnisme physicaliste à partir d'une distinction conceptuelle entre « réduction » (« *reduction* ») et « analyse » (« *analysis* »). Plus précisément, Mayr (2004) associait le concept de réduction à deux présupposés normatifs très forts. Le premier présupposé est qu'aucun phénomène biologique ne saura être compris de manière adéquate tant qu'il n'aura pas fait l'objet d'une analyse qui remonte jusqu'au niveau de ses composantes physico-chimiques. L'autre présupposé est que l'étude des composantes les plus élémentaires d'un système biologique permet d'en reconstituer, et d'en expliquer, « de manière exhaustive » (« *exhaustively* »), les propriétés d'ordre supérieur, sur la base du présupposé que « le tout n'est rien d'autre que la somme arithmétique de ses parties » (« *wholes are not more than the additive sums of their parts* ») (Mayr 2004, p. 72). Le concept d'analyse renvoie, bien au contraire, à un principe heuristique qui a été, aux yeux de Mayr (2004), fondamental pour l'essor de la biologie moderne : afin d'étudier un système un tant soit peu complexe, il est nécessaire de le « disséquer » (« *dissecting* »), mais seulement dans la mesure où une telle démarche s'avère empiriquement féconde, et non pas par parti pris. Autrement dit, il s'agit d'un concept qui comporte un principe qui est de nature « hautement heuristique » (« *highly heuristic* »), et donc non pas épistémologique, voire métaphysique. En cela, un tel principe s'inscrit dans une tendance historique, pour ainsi dire, à la « miniaturisation » que Mayr (2004) regardait comme étant tout à fait caractéristique des sciences de la vie et qui s'est traduite, par exemple, par l'évolution de l'« anatomie brute » (« *gross anatomy* ») en « microscopie » (« *microscopy* ») et de « la physiologie des organes » (« *organ physiology* ») en « physiologie cellulaire » (« *cellular physiology* ») (Mayr 2004, p. 71). Il en découle que Mayr (2004) considérait que le tort de l'épistémologie physicaliste, lorsqu'elle s'applique aux sciences de la vie, consisterait, précisément, à équivoquer la différence entre réduction et analyse, en traitant, par conséquent, des exemples historiques d'application de ce second concept comme s'il s'agissait d'applications du premier. Mais quels seraient donc, toujours aux yeux de Mayr (2004), les obstacles que rencontrerait l'application de la démarche réductionniste à la biologie, et notamment à la biologie de l'évolution ?

À ce sujet, Mayr (2004) énumérait un certain nombre de caractéristiques particulières du vivant qui constitueraient autant de problèmes pour le réductionnisme physicaliste (Mayr 2004, p. 28-37). Contrairement à Dobzhansky (1968, 1969), Mayr (2004) estimait, par exemple, que la complexité des systèmes vivants, c'est-à-dire le fait qu'ils soient organisés en une hiérarchie de niveaux qui

totallement ce qui est à venir ». 3) « La structure et la variation de tous les phénomènes doivent s'expliquer au moyen de l'essentialisme ». 4) « Une explication complète exige une réduction cohérente ». 5) « Les théories sont véritablement scientifiques uniquement si elles s'expriment en termes mathématiques (Galilée, Leibniz, Kant) ». 6) « L'expérience est la première méthode de la science, et peut-être la seule qui soit légitime » (Delisle 2009, p. 357).

comporte l'émergence de propriétés fonctionnelles différenciées – telles que la reproduction, le métabolisme, la réplication, la régulation, l'adaptabilité, la croissance et l'organisation hiérarchique elle-même (Mayr 2004, p. 29) – à tous les échelons du monde organique, nécessiterait l'adoption d'une « pensée holiste » (« *holistic thinking* »), à l'exclusion, justement, de ce que Dobzhansky (1968, 1969) appelait le point de vue cartésien ou réductionniste. Parmi les autres caractéristiques du vivant qui constitueraient autant de contraintes à l'application d'une démarche réductionniste, Mayr (2004) soulignait, en outre, le fait de la non-reproductibilité des phénomènes qui sont étudiés par les biologistes, qui est d'autant plus significatif lorsqu'il s'agit de phénomènes évolutifs comme, par exemple, la spéciation, l'extinction d'espèces ou de *taxa* supérieurs, voire les grandes transitions évolutives, telle l'émergence d'organismes pluricellulaires (Mayr 2004, p. 32). Ces phénomènes nécessiteraient, par conséquent, une méthodologie différente, qui implique la construction de « récits historiques » (« *historical narratives* ») dont la validité dépend de leur fécondité explicative, plutôt que de leur vérifiabilité empirique, ainsi que l'adoption d'une démarche comparative (Mayr 2004, p. 32-33). Par conséquent, c'est sur la base du constat de l'importance de ces deux caractéristiques fondamentales pour la compréhension des phénomènes biologiques que Mayr (2004) pouvait en conclure que ces derniers ne sauraient s'expliquer par la simple application de lois universelles à leurs constituants physico-chimiques. Il en découle que, par-delà les différences d'appréciation au sujet de la compatibilité entre le point de vue réductionniste et le point de vue compositionnel (ou holiste) qui existaient entre ces deux auteurs, les écrits de Dobzhansky (1968, 1969) et de Mayr (1982, 1995, 2004) que nous venons d'analyser témoignent d'une opposition commune à l'influence de quelques-unes des thèses fondamentales de l'empirisme logique quant aux rapports entre sciences physico-chimiques et sciences de la vie, notamment telles que les avait développées Nagel (1961). Par conséquent, en quoi serait-on justifié d'émettre l'hypothèse que, malgré toutes ces résistances théoriques, l'*ethos* que partageaient les architectes de la Synthèse Moderne aurait été forgé par la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne et au Mouvement pour l'unité de la science ? La réponse que nous pouvons apporter à une telle question consiste à mettre en valeur l'importance de la contextualisation historique. Il se peut, en effet, que l'hostilité aux thèses logicistes-empiristes au sujet des fondements des sciences de la vie dont nous venons de parler ait marqué une phase particulière de la Synthèse Moderne en tant que processus historique, qu'il faudrait donc situer dans un contexte historique plus large, afin de pouvoir identifier ce qui la distingue d'autres phases que l'on pourrait identifier au sein de ce même processus. Cela soulève, néanmoins, la question suivante : comment pourrait-on caractériser la Synthèse Moderne en tant que processus historique ?

Avant de répondre à une telle question, il faut tout d'abord préciser, de manière plus rigoureuse que nous ne l'avons fait jusqu'ici, ce que l'on entend lorsqu'on parle de « théorie synthétique ». Comme le remarquent V. Betty Smocovitis (1996) et Jean Gayon (Gayon & Huneman 2019), bien que les termes « Synthèse Moderne » (« *Modern Synthesis* ») et « théorie synthétique [de l'évolution] » (« *synthetic theory* ») soient souvent utilisés comme s'ils étaient parfaitement synonymes, cela n'a pas toujours été le cas. Pour sa part, Smocovitis (1996) observe incidemment que, si le mot « théorie synthétique » a toujours été employé pour faire référence à la théorie issue du processus d'unification des sciences de la vie qui s'est déroulé au cours de la première moitié du XX^e siècle, comme conséquence de la preuve de la compatibilité entre la génétique mendélienne et la théorie de Darwin, le terme « Synthèse Moderne » a originellement été introduit non pas pour désigner la première, mais le second, du moins tel que le décrit Julian Huxley (1942) dans son livre intitulé, précisément, « *Evolution : The Modern Synthesis* » (« *Évolution : la Synthèse Moderne* »)¹⁸. En reprenant à son compte cette distinction conceptuelle, Gayon (Gayon & Huneman 2019) précisait que la première occurrence du mot « théorie synthétique » apparaît dans l'ouvrage que George Gaylord Simpson (1949) consacra à « la signification de l'évolution » (« *the meaning of evolution* »). Plus précisément, Simpson (1949) emploie ce terme dans le chapitre où il livre à ses lecteurs une reconstruction rétrospective de l'histoire de la science de l'évolution, dans le but affiché de mettre en valeur la contribution que les généticiens des populations et les généticiens écologiques ont apportée à la compréhension des facteurs causaux des phénomènes évolutifs. Il explique, par conséquent, que, à l'aube du XX^e siècle, alors que les néodarwiniens tels qu'August Weismann (1868) maintenaient que la sélection naturelle était la seule cause des phénomènes évolutifs et les mutationnistes comme Hugo de Vries (1901, 1903, 1906) « prétendaient qu'il n'y a pas d'adaptation, mais seulement une préadaptation accidentelle » (« *they proclaimed that there is no adaptation, only chance preadaptation* ») (Simpson 1949 ; 1950b, p. 241)¹⁹, les généticiens commencèrent à se demander

¹⁸ À ce sujet, Gayon (Gayon & Huneman 2019) observe que, même si d'autres biologistes avant Huxley (1942) avaient certainement exprimé le souhait d'une synthèse d'idées ou de disciplines, il s'était toujours agi d'usages occasionnels. Après que Huxley (1942) l'eut choisi comme titre de son ouvrage programmatique, ce terme « ne pouvait plus être utilisée naïvement. Cette expression renvoyait à un livre, publié à une certaine date, par quelqu'un qui a joué un rôle énorme dans la mise en place du nouveau cadre institutionnel et intellectuel des études de l'évolution [*'The expression referred to a book, published at a certain date, by someone who played a huge role in building the new institutional and intellectual framework of evolutionary studies'*] » (Gayon & Huneman 2019).

¹⁹ « Le terme de 'préadaptation' signifie apparition accidentelle, par mutation, de caractères non-adaptatifs ou inadaptatifs pour le mode de vie ancestral, mais adaptatifs pour quelque autre mode de vie éventuel » (« *By 'preadaptation' is meant the random origin, by mutation, of characteristics non-adaptive or inadaptive for the ancestral way of life, but adaptive for some other way of life which happens to be available* ») (Simpson 1949 ; 1950b, p. 207).

quels effets pourrait avoir la sélection naturelle sur les facteurs héréditaires qu'ils étudiaient chez les individus et chez les populations. Ce faisant, ils parvinrent à « donner pour la première fois une claire vision opérationnelle des effets de la sélection naturelle » (« *providing for the first time a clear view operational view of the effect of natural selection* ») (Gayon & Huneman 2019), en rétablissant ainsi la science de l'évolution comme « foyer de toutes les sciences de la vie » (« *focal point of all the life sciences* ») (Simpson 1949 ; 1950b, p. 242). C'est ainsi que, toujours d'après Simpson (1949), des chercheurs tels que, « en Angleterre, Fisher, Haldane, Huxley, Darlington, Waddington et Ford ; aux États-Unis, Wright, Muller, Dobzhansky, Mayr, Dice et Stebbins ; en Allemagne, Timoféeff-Ressovsky et Rensch ; en Russie Soviétique, Chetverykov et Dubinin ; en France, Teissier ; en Italie, Buzzati-Traverso » ont pu contribuer, chacun dans son domaine, « à la synthèse en cours de réalisation » (« *to the growing synthesis* ») (Simpson 1949 ; 1950b, p. 242).

C'est à partir de telles considérations que Simpson (1949) pouvait lui-même en conclure que la théorie synthétique issue de ce travail collectif

a placé l'étude des causes de l'évolution [*'the study of the causes of evolution'*] sur des bases nouvelles et solides [*'on a new and firm footing'*] et a réalisé l'accord sur ce que sont ces causes, dans une mesure jamais réalisée auparavant. Il semble que nous ayons enfin une théorie unifiée [*'a unified theory'*] – quoiqu'inévitablement complexe, car l'évolution elle-même est une interaction complexe de différents processus [*'a complex interaction of different processes'*] – qui est capable de faire face à tous les problèmes classiques de l'histoire de la vie et de donner à chacun une solution causaliste [*'causalistic solution'*] (Simpson 1949 ; 1950b, p. 242-243).

Dans ce passage, comme l'observe Jean Gayon (Gayon & Huneman 2019), Simpson (1949) va bien au-delà de ce qu'avait préconisé Huxley (1942), vu que ce dernier s'était limité à remarquer que « la génétique, la physiologie, l'écologie, la systématique, la paléontologie, la cytologie, l'analyse mathématique [avaient] toutes mis en avant de nouveaux faits ou de nouveaux outils de recherche [*'provided new facts or new tools of research'*] » pour faire avancer notre compréhension de l'évolution, si bien que l'heure était désormais à une « attaque concertée » (« *concerted attack* ») et à la « synthèse » (« *synthesis* ») (Huxley 1942, p. xii). Bien au contraire, Simpson (1949) présente la synthèse comme un fait avéré et lui attribue le mérite d'avoir apporté une solution à des problèmes classiques de l'histoire des sciences naturelles, et notamment à celui de l'origine et du développement des espèces organiques, qui consiste à identifier dans les différents « facteurs de l'évolution » (« *evolutionary factors* ») les causes principales des phénomènes que concernent ces mêmes problèmes. Nous pouvons en conclure, par conséquent, que la Synthèse Moderne constitue un objet

historique « bifrons ». Premièrement, elle peut être considérée comme étant une théorie scientifique, et plus précisément comme étant une « théorie génétique » (« *genetical theory* ») (Fisher 1930), car fondée sur la génétique mendélienne, de l'évolution par sélection naturelle. Plus précisément, dans cette première acception du terme, la théorie synthétique n'est rien d'autre que la génétique théorique des populations en tant que « topique transcendantale de la science de l'évolution, sous hypothèse mendélienne », et donc en tant que « science formelle et prédictive capable de penser les conditions sous lesquelles la sélection *pourrait* être le facteur majeur de l'évolution » (Gayon 1992, p. 332). Deuxièmement, elle peut être regardée comme étant le processus qui a abouti – du moins dans les intentions de ses architectes – à l'unification des sciences de la vie au sein d'un cadre conceptuel défini par des principes darwiniens, et donc comme étant un événement historico-institutionnel. De plus, dans cette seconde perspective, la Synthèse Moderne aurait également consisté dans un événement institutionnel, au sens où elle aurait contribué à fonder non seulement une théorie de l'évolution, mais également une communauté scientifique de « professionnels de l'évolution », comme l'a observé Michael Ruse (2009)²⁰. Il existe, néanmoins, un troisième aspect de la Synthèse Moderne, dans la mesure où cette dernière peut être considérée comme étant un cadre conceptuel enveloppant un certain nombre de théories subordonnées, dont les domaines d'application respectifs couvrent tout le spectre des sciences du vivant. C'est précisément pour cette raison que l'on pourrait donc distinguer la Synthèse Moderne en tant que « théorie synthétique de l'évolution » de la Synthèse Moderne en tant que « cadre conceptuel synthétique pour les sciences du vivant », c'est-à-dire dans la mesure où la première consisterait dans la synthèse entre la génétique mendélienne et la théorie de Darwin (1859), alors que la seconde ne serait qu'une extension de la première à d'autres domaines des sciences du vivant. Il en découle que, si l'on veut définir une fois pour toutes ce qu'est la Synthèse Moderne, il est nécessaire de comprendre, au préalable, quels sont les rapports qu'entretiennent ces trois aspects d'un seul et même objet. Par conséquent, en quoi consiste, plus précisément, la Synthèse

²⁰ « Finalement, c'est au cours des années 1930 que la transition de la science populaire à la science professionnelle [*'move from popular science to professional science'*]. Premièrement, ce furent les mathématiciens, les généticiens des populations [*'the mathematicians, the population geneticists'*] ... Ensuite, sont venus les empiristes, les expérimentateurs et les naturalistes [*'the empiricists, the experimenters, and naturalists'*], qui ont mis de la chair autour de l'os des mathématiques : E. B. Ford et son école en Grande Bretagne, ainsi que Theodosius Dobzhansky et ses collègues évolutionnistes aux États-Unis. C'est à cette époque que nous trouvons des postes universitaires, des chercheurs, des thésards et des allocations de recherche, des revues, des sociétés savantes, et tout ce que nous associons à l'idée d'une science professionnelle [*'everything else we associate with professional science'*], et cela non seulement d'un point de vue sociologique, parce que le travail que l'on accomplissait était solidement fondé sur des études empiriques, qui avaient recours à des modèles mathématiques pour expliquer les phénomènes en question [*'the work produced was firmly based on empirical studies with mathematical models doing the explaining'*] » (Ruse 2009, p. 10042).

Moderne comme cadre conceptuel et en quoi est-elle liée à la Synthèse Moderne comme théorie scientifique et à la Synthèse Moderne comme processus historico-institutionnel ? Dans quelle mesure pourrions-nous appliquer la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous aurons déduite de notre analyse de la conception classique des théories scientifiques au cas spécifique de la Synthèse Moderne ? Quelle vision de la structure de la théorie synthétique de l'évolution et de l'histoire de la Synthèse Moderne impliquerait une telle reconstruction ?

Afin de répondre à toutes ces questions, nous nous concentrerons, dans la première partie de cette thèse, sur le problème de définir ce qu'est un cadre conceptuel. Comme nous l'avons anticipé plus haut, nous partirons de la conception classique des théories scientifiques, en tant qu'exemple paradigmatique de cadre conceptuel, afin d'en dégager une définition plus générale de ce même concept. Dans le premier chapitre (chapitre 1), nous analyserons, par conséquent, les fondements logiques et méthodologiques de la conception classique, dans le but de mettre en évidence les liens qu'elle entretient avec la vision de la théorie de la connaissance comme analyse de la syntaxe logique du langage, ou plutôt des langages, des sciences empiriques qu'a élaborée Rudolf Carnap (1934, 1936b, 1937, 1945a). Nous mettrons en évidence en quoi cette vision de la théorie de la connaissance reposait sur une conception des différentes disciplines scientifiques comme étant des cadres linguistiques, ce qui impliquait, par conséquent, que l'analyse de leur syntaxe logique consisterait, essentiellement, à construire un cadre métalinguistique et métathéorique qui permette d'en expliciter les propriétés formelles. Dans le chapitre suivant (chapitre 2), nous analyserons un autre fondement de la conception classique des théories scientifiques, c'est-à-dire l'extension au domaine des sciences empiriques du programme d'axiomatisation et de reconstruction formelle du savoir mathématique qui fut inauguré par David Hilbert (1899, 1901, 1923) à l'aube du XX^{ème} siècle. Nous montrerons, tout particulièrement, quels sont les problèmes que ce même programme a légués à la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique, ainsi que la manière dont ces problématiques ont elles-mêmes contribué à l'élaboration de la conception classique des théories scientifiques. Dans le chapitre conclusif de la première partie (chapitre 3), nous approfondirons les conclusions que nous aurons tirées dans les chapitres précédents afin d'élaborer, justement, une définition de ce qu'est un cadre conceptuel qui se fonde sur une certaine lecture de la manière dont Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a lui-même développée la conception classique des théories scientifiques. Nous montrerons, notamment, en quoi la vision carnapienne de la conception classique était une vision que l'on peut qualifier de « dichotomique », en ceci qu'elle visait à sauvegarder la distinction entre énoncés (scientifiques) analytiques et énoncés (scientifiques) synthétique, ainsi que de « structuraliste », dans la mesure où elle avait fini par incarner la thèse que la connaissance empirique du monde consisterait à identifier les relations formelles entre éléments sensoriels qui

constitueraient la structure de toute expérience phénoménique. De telles conclusions nous permettront, ainsi, d'aborder, dans la seconde partie de cette thèse, la question de savoir en quoi la théorie synthétique de l'évolution constituerait elle-même un cadre conceptuel. Pour ce faire, nous adopterons, comme l'indique le titre même de cette thèse, une approche qui est à la fois historique et philosophique.

C'est pourquoi, dans le premier chapitre de la seconde partie (chapitre 1), nous nous concentrerons sur les problèmes interprétatifs que soulève la tentative d'identifier une théorie synthétique de l'évolution qui se serait constituée, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, au cours des différentes phases de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel. Cela nous amènera à formuler deux hypothèses, de nature historiographique et épistémologique, au sujet des origines et de la structure de cette théorie synthétique. La première de ces deux hypothèses, que nous élaborerons à partir des analyses d'Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a), consiste à affirmer que la théorie synthétique de l'évolution se serait constituée, en tant que cadre conceptuel, sur le fondement des contributions que la systématique évolutive a apportées au développement de la Synthèse Moderne, et plus précisément sur une vision organismique et populationnelle de l'évolution. L'autre hypothèse, que nous établirons à partir des réflexions de William B. Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et de Stephen Jay Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), consiste, en revanche, à affirmer que la théorie synthétique se serait édifiée, en tant que cadre conceptuel, sur la base d'une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle qui serait, elle aussi, de nature synthétique. Cette théorie reposerait, en effet, sur la synthèse entre le modèle mendélien des mécanismes de transmission héréditaire et l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle qui aurait été rendue possible par une interprétation génétique et statistique de cette dernière. Afin de montrer en quoi l'on pourrait mettre à l'épreuve ces deux hypothèses alternatives, et notamment la seconde, nous nous concentrerons, par la suite, sur les contributions que Theodosius Dobzhansky (1951, 1970) a apportée à l'élaboration de la théorie synthétique, notamment dans les deux dernières éditions de son ouvrage sur la génétique et l'origine des espèces. Plus précisément, nous montrerons en quoi de telles contributions se prêtent à une interprétation adaptationniste, d'après laquelle Dobzhansky (1951, 1970) aurait conçu la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel, comme étant une extension à des disciplines telles que la systématique ou la paléontologie des contraintes que les modèles mathématiques de la génétique des populations, et notamment les topographies adaptatives de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932), avaient imposées à la théorie de Darwin (1859) pour en faire une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle. C'est pourquoi, dans le chapitre suivant (chapitre 2), nous nous servirons précisément de la vision « dobzhanskyenne » de la théorie synthétique de l'évolution pour répondre directement à la question de savoir en quoi cette dernière

pourrait effectivement se conformer à la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous aurons dégagée au long de la première partie de cette thèse. Dans une telle perspective, la pensée évolutive de Dobzhansky (1951, 1970) jouera, par conséquent, le rôle de pont conceptuel entre la question de l'interprétation historiographique de la Synthèse Moderne et celle de la reconstruction formelle de la théorie synthétique qui en serait issue. Pour effectuer cette transition, nous nous appuierons également sur deux tentatives de formalisation de la théorie de l'évolution qui sont communément associées à la conception classique des théories scientifiques, en tant qu'approche syntaxique des théories scientifiques, à savoir l'axiomatisation qu'en a proposée Michael Ruse (1973) et celle qu'en ont proposée Mary B. Williams (1970) et Alexander Rosenberg (1985). Plus précisément, nous analyserons les différentes problématiques que soulèvent ces deux axiomatisations et nous tâcherons de montrer en quoi elles nous permettent de mobiliser la conception classique des théories scientifiques afin de reconstruire la théorie synthétique de l'évolution non seulement sous la forme d'un cadre métalinguistique et métathéorique, mais également sous la forme d'un véritable cadre conceptuel. Cela nous amènera, en retour, à jeter un nouveau jour sur les aspects problématiques de la conception classique des théories scientifiques en tant que telle.

Première partie

Qu'est-ce qu'un cadre conceptuel ? Les approches formelles de la structure et du contenu des théories scientifiques et la conception « structuraliste » des cadres conceptuels

Vue d'ensemble sur la première partie

nous verrons, dans un premier temps (chapitre 1), en quoi les principes fondamentaux sur lesquelles repose la conception scientifique du monde propre à la philosophie du Cercle de Vienne et à la tradition de l'empirisme logique, à savoir ce que Willard Van Orman Quine (1951, 1953) appelait le « dogme de l'analyticité » (« *dogma of analyticity* ») et le « dogme du réductionnisme » (« *dogma of reductionism* »), impliquent une certaine conception de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique. Plus précisément, il s'agit d'une conception que nous qualifierons de « syntaxique » et qui s'est traduite par une vision de la science, en tant que corps de connaissances, comme système des énoncés qui relèvent d'un « langage universel de la science » (« *Universalsprache der Wissenschaft* »), défini sur le modèle d'une reconstruction purement syntaxique du « langage de la physique » (Carnap 1932b). Cela nous permettra de montrer en quoi la nécessité de répondre à la question de savoir de quelle manière l'on pourrait donner une interprétation empirique de ce même langage a conduit Rudolf Carnap (1936b, 1937) à reformuler une telle conception, et plus précisément à envisager la science comme étant un « cadre linguistique » (« *linguistic framework* ») (Lutz 2012). D'ailleurs, c'est précisément cela qui lui a donné les moyens pour poser les jalons de ce qu'on pourrait appeler la conception « orthodoxe » des théories scientifiques qui est caractéristique de l'empirisme logique, c'est-à-dire ce qu'on appelle normalement la « conception classique des théories scientifiques » (« *received view of scientific theories* ») (Putnam 1962). Mais en quoi consiste, donc une telle conception des théories scientifiques ? Afin de répondre à cette autre question, nous verrons, dans un deuxième temps (chapitre 2), en quoi la conception classique constitue un exemple paradigmatique de ce qu'on appelle communément une « conception syntaxique des théories scientifiques » (« *syntactic view of scientific theories* ») (Mormann 2007 ; Vorms 2009, 2011 ; Winther 2015), c'est-à-dire une vision des théories scientifiques comme objets linguistiques, et notamment comme systèmes axiomatiques de formules qui sont, à priori, dépourvues de toute signification cognitive. Plus précisément, nous montrerons en quoi il est possible d'interpréter une telle vision des théories scientifiques comme étant une extension au domaine des sciences empiriques du programme d'axiomatisation des sciences mathématiques qui avait été lancé par le mathématicien allemand David Hilbert (1899, 1901, 1923) et par les membres de l'école, dite « formaliste », qui s'était constituée autour de sa personne. Afin d'éclaircir la manière dont s'est effectuée une telle extension, nous nous concentrerons, encore une fois, sur la façon dont Rudolf Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a tâché de résoudre le problème de l'interprétation

empirique des énoncés scientifiques, quoique, dans ce cas particulier, non pas en relation au corps entier des connaissances scientifiques, mais par rapport aux cadres que constituent les différentes théories scientifiques. Cela nous permettra d'en conclure que ce dernier en est venu à redéfinir la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre métalinguistique et métathéorique. Plus précisément, nous défendrons la thèse que Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par concevoir la conception classique comme étant un cadre qui se composerait de deux volets : d'une part, un volet syntaxique, c'est-à-dire d'une (méta)théorie de l'axiomatisation des théories qui relèvent des sciences empiriques ; d'autre part, un volet sémantique, c'est-à-dire d'une (méta)théorie de l'interprétation du langage des sciences empiriques comme interprétation (partielle) des termes théoriques (c'est-à-dire des termes de ce même langage qui désignent des entités abstraites) en fonction de classes de termes observationnels (c'est-à-dire de termes de ce même langage qui désignent des entités que l'on peut s'accorder pour définir comme étant observables). Cela dit, en quoi la conception classique constituerait non seulement un cadre métalinguistique et métathéorique, mais également un véritable cadre conceptuel ? C'est précisément pour répondre à cette dernière question que nous verrons, dans un troisième temps (chapitre 3), en quoi l'interprétation de la conception classique que nous pouvons déduire de Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) consiste dans une interprétation « dichotomique », en ceci qu'elle vise à séparer les composantes analytiques et les composantes synthétiques des théories que l'on souhaite reconstruire formellement, dans le but d'identifier trois éléments : premièrement, le contenu conceptuel de la théorie en question, qui n'est rien d'autre que l'expression de son architecture conceptuelle sous la forme d'un réseau de relations logiques entre termes ou énoncés théoriques ; deuxièmement, son contenu empirique ou factuel, c'est-à-dire la manière dont elle permet de représenter la structure qui est inhérente au domaine de l'expérience qu'elle est censée systématiser, c'est-à-dire ordonner, par la déduction et la mise en relation d'énoncés observationnels ; troisièmement, la manière dont ces deux contenus théoriques s'articulent l'un à l'autre. Nous verrons, par conséquent, de quelle manière l'analyse de la structure syntaxique du volet théorique du langage formel que la conception classique préconise d'utiliser pour reconstruire telle ou telle théorie scientifique, ainsi que d'un possible critère de signification empirique pour les termes qui relèvent de ce même langage, qu'a effectuée Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) nous permet de comprendre en quoi la conception classique constitue un véritable cadre conceptuel. Nous en concluons, en effet, que le système axiomatique que permet d'envisager une interprétation dichotomique de la conception classique constitue un « schéma de pensée » (« *conceptual scheme* ») (Quine 1960) qui impose aux théories qui sont reconstruites à son instar des contraintes – de nature ontologique, épistémologique et conceptuelle – qui affectent l'architecture

conceptuelle et le contenu factuel de ces dernières. De plus nous montrerons que la manière dont la conception classique, toujours telle que l'envisageait Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), exerce de telles contraintes sur les théories scientifiques nous permet d'en déduire une définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous qualifierons de « structuraliste ». Mais est-ce qu'une définition de cette nature s'appliquerait-elle au cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution ?

Chapitre 1

La science comme cadre linguistique : de la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne à la conception classique des théories scientifiques

Quel exemple paradigmatique de ce qu'est un cadre conceptuel pourrions-nous donc tirer de la conception scientifique du monde qui a caractérisé le Cercle de Vienne ou, plus généralement, le courant de l'empirisme logique ? Afin de répondre à une telle question, il est nécessaire d'analyser la conception des théories scientifiques que l'on peut qualifier de « conception orthodoxe » (« *orthodox view* ») du Cercle de Vienne (Uebel 1996, p. 96) et de l'empirisme logique – en ceci qu'elle est directement liée à cette même conception scientifique du monde et qu'elle est issue, entre autres, des contributions de Carl G. Hempel (1950a, 1950b, 1951, 1952, 1954, 1958, 1965, 1970), Rudolf Carnap (1932a, 1932b, 1932c, 1934, 1936a, 1936b, 1937, 1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et Ernest Nagel (1961) – mais qui est généralement connue sous le nom de « conception classique des théories scientifiques » (Putnam 1962)²¹. D'après une telle conception, qui a été élaborée au cours d'une période allant du milieu des années 1930 au milieu des années 1960, « il faut se représenter les théories comme des 'calculs partiellement interprétés' [*partially interpreted calculi*'], dans lesquels seuls les 'termes observationnels' [*observation terms*'] sont 'directement interprétés' [*directly interpreted*'] » (Putnam 1962 ; Jacob 1980b, p. 241). Autrement dit, la conception classique des théories scientifiques préconise d'analyser le contenu et la structure de telle ou telle théorie au moyen d'outils formels particuliers, qui permettent de reconstruire cette même structure et ce même contenu sous la forme d'un « système déductif et axiomatisé de formules non interprétées » (« *axiomatized deductive system of uninterpreted formulas* ») (Hempel 1970, p. 146), dont les axiomes correspondent précisément aux principes fondamentaux de la théorie en question²².

²¹ Il faut, tout de même, rappeler qu'une telle conception a également été appelée de bien d'autres manières (Winther 2015) : « approche syntaxique » (« *syntactic approach* ») (van Fraassen 1970, 1989), « conception syntaxique » (« *syntactic view* ») (Wessels 1974), « conception standard » (« *standard conception* ») (Hempel 1970), « conception orthodoxe » (« *orthodox view* ») (Feigl 1970), « conception énonciative » (« *statement view* ») (Moulines 1976, 2002 ; Stegmüller 1976), « approche axiomatique » (« *axiomatic approach* ») (van Fraassen 1989) et « feu conception classique » (« *once received view* ») (Craver 2002).

²² De tels axiomes ne sont, par conséquent, rien d'autre que les formules que l'on peut obtenir en retranscrivant les principes internes de la théorie en question dans un langage logique, où « les termes primitifs [*primitive terms*'] [c'est-à-dire les termes qui ne sont pas explicitement définis au sein de la théorie, mais qui sont implicitement définis par les

Un tel système est donc associé à des règles de formation (« *formative rules* »), qui permettent de former des formules représentant des énoncés sur la base d'un certain ensemble de symboles – appelé « vocabulaire » de la théorie –, à des règles d'inférence, qui permettent de dériver d'autres formules à partir de celles que l'on a déjà établies, ainsi qu'à un ensemble « d'énoncés qui fournissent un contenu empirique [*'empirical import'*] au calcul, ou le rendent applicable, en interprétant certaines de ses formules en termes empiriques, et notamment dans les termes du vocabulaire qui sert à décrire les phénomènes que la théorie est censée expliquer [*'in terms of the vocabulary that serves to describe the phenomena which the theory is to explain'*] » (Hempel 1970, p. 146)²³. Pour ce faire, il est donc nécessaire de traduire les énoncés de la théorie que l'on est en train de se représenter, sous la forme d'un système axiomatisé, en formules d'un certain langage formel, ou formalisé, \mathcal{L}^{24} – généralement, mais non nécessairement, un langage de la logique des prédicats du premier ordre – et de subdiviser de telles formules en deux catégories : d'une part, des formules qui représentent des énoncés proprement théoriques, et qui ne contiennent, par conséquent, que des termes dénotant des concepts et des entités théoriques, c'est-à-dire qui ne sont pas directement observables, mais dont on présuppose néanmoins l'existence, en guise de conjecture – ou bien des termes issus du vocabulaire logique de la théorie²⁵ ; d'autre part, des formules qui représentent des énoncés mixtes, en ceci qu'elles contiennent à la fois des termes théoriques, des termes logiques et des termes

axiomes dans lesquels ils apparaissent] ...sont remplacés par des variables ou par des constantes fictives [*'dummy constants'*] » (Hempel 1970, p. 146).

²³ Hempel (1970) précise également que de tels énoncés « ont été caractérisés par [Norman Robert] Campbell et [Frank Plumpton] Ramsey comme constituant le 'dictionnaire' [*'dictionary'*] qui met en correspondance les termes théoriques avec les termes préthéoriques », alors que d'autres auteurs les ont appelés « définitions opérationnelles » (« *operational definitions* »), « règles de correspondance » (« *rules of correspondence* »), ou encore « principes d'interprétation » (« *interpretative principles* ») (Hempel 1970, p. 146).

²⁴ Comme l'explique Pierre Wagner (2014), « pour analyser la validité des inférences (ou plus généralement la correction logique des raisonnements) on doit pouvoir exprimer ces inférences dans un langage. Mais la langue quotidienne répond à des fins multiples (transmettre des informations, exprimer des émotions, inventer des fictions, persuader ou tromper un interlocuteur, etc.), souvent bien différentes de la formulation de raisonnements logiquement corrects ». En conséquence, c'est précisément d'un tel constat que naît « l'idée de construire un langage dont le vocabulaire et les règles syntaxiques ne retiennent des langues usuelles que ce qui importe à l'analyse des inférences et de la relation de conséquence logique » (Wagner 2014, p. 25-26), c'est-à-dire l'idée de construire un langage formel, ou formalisé.

²⁵ Le vocabulaire logique d'une théorie donnée est constitué par l'ensemble des termes qui consistent en des combinaisons de signes (ou symboles) logiques relevant d'un certain langage logico-formel, tels que, *a minima*, « (a) les connecteurs propositionnels : négation (\sim), conjonction (\wedge), disjonction (\vee), implication (\rightarrow) et équivalence (\leftrightarrow) ; (b) le quantificateur existentiel (\exists) et le quantificateur universel (\forall) ; (c) un nombre illimité de variables d'individu : x, y, z, x_1, x_2 », etc. (Wagner 2014, p. 56).

observationnels, c'est-à-dire des termes dénotant des propriétés et des entités empiriquement observables. En conséquence, seuls les termes observationnels sont interprétés de manière directe, ce qui signifie que seulement ces derniers sont directement associés aux objets qui constituent le domaine de référence de la théorie ainsi reformulée (il peut s'agir de phénomènes, de mesures expérimentales, etc.) par une relation de désignation, si bien que, afin de fournir une interprétation aux termes théoriques, c'est-à-dire afin de leur attribuer une signification, il est nécessaire de les mettre en correspondance, autrement dit de les coordonner, avec termes observationnels. Il en découle que, comme l'observe Carl G. Hempel (1970), une théorie scientifique, en tant que calcul logique partiellement interprété, peut être envisagée comme un couple ordonné d'ensembles de formules :

$$T = (C, R)$$

où C est l'ensemble des formules du calcul logique qui traduisent les énoncés proprement théoriques dont se compose la théorie en question, c'est-à-dire qui en représentent le contenu purement conceptuel. R est, en revanche, l'ensemble des formules qui représentent les énoncés mixtes en lesquels consistent les règles de correspondance, ou principes d'interprétation, qui confèrent une signification empirique aux énoncés du calcul eux-mêmes (Hempel 1970, p. 146-147), et qui constituent ainsi – en conjonction avec leurs conséquences empiriques, c'est-à-dire en conjonction avec tous les énoncés formulables dans le langage observationnel qui sont des conséquences logiques de ces mêmes règles de correspondance – le contenu empirique de la théorie en question. Mais que pouvons-nous déduire d'une telle représentation schématique de la structure et du contenu des théories scientifiques qui sont reconstruites sur le modèle de la conception classique ?

En premier lieu, nous pouvons en déduire que, d'après la conception classique des théories scientifiques, toute théorie se compose de deux versants distincts, à savoir d'un volet abstrait et formel, ainsi que d'un volet appliqué et empirique. Plus précisément, ces deux versants ne sont rien d'autre qu'autant d'ensembles de définitions de nature, pour ainsi dire, « complémentaire » : d'une part, le volet formel constitue un « système de définitions implicites » (« *System impliziter Definitionen* ») (Carnap *et al.* 1929), c'est-à-dire un ensemble d'énoncés dont la signification est partiellement déterminée par les relations logiques qu'ils entretiennent les uns avec les autres ; d'autre part, le volet empirique n'est rien d'autre qu'un ensemble de règles ou de « définitions de coordination » (« *Zuordnungsdefinitionen* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Reichenbach 1951) dont la fonction consiste à déterminer, quoique de manière non exhaustive, la signification de tous les énoncés de l'autre volet qui ne sont pas purement tautologiques, en établissant des relations logiques entre des termes théoriques et des termes observationnels. Une telle dualité ne saurait, néanmoins, se

réduire à une caractéristique exclusivement structurelle des théories comme unités d'organisation du savoir, en ceci que, toujours d'après la conception classique des théories scientifiques, elle serait également le reflet de la dynamique de croissance qui caractérise la connaissance scientifique en tant que telle. En effet, comme l'écrivent explicitement Carnap *et al.* (1929), dans ce qu'on appelle communément le « manifeste du Cercle de Vienne », « l'évolution de la science empirique qui veut reproduire le réel à l'aide d'un réseau de concepts et de jugements le plus simple et le plus unitaire possible » (« *die Entwicklung der empirischen Wissenschaft, die die Wirklichkeit mit einem möglichst einheitlichen und einfachen Netz von Begriffen und Urteilen wiedergeben will* ») peut se produire de deux manières différentes, en ceci que « les modifications entraînées par de nouvelles expériences [*die durch neue Erfahrungen erforderlichen Änderungen*'] peuvent affecter soit les axiomes [*Axiomen*'], soit les 'définitions de coordination' » dont se composent les théories en question (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 117). Par conséquent, les deux versants structurels des théories dont nous venons de parler correspondraient, aux yeux de Carnap *et al.* (1929), à autant de modalités alternatives dans lesquelles peut se développer le savoir scientifique. Il en découle que, en vertu du lien génétique qu'elle entretient avec la conception scientifique du monde qui a caractérisé le Cercle de Vienne, et plus généralement le courant de l'empirisme logique, la conception classique des théories scientifiques incarne non seulement une vision dualiste de la structure et du contenu des théories scientifiques, mais également une vision dualiste de la science comme activité. C'est ainsi que la représentation schématique de ce en quoi consiste une théorie scientifique, d'après la conception classique, que nous venons de décrire nous permet également d'en conclure que, afin d'identifier en quoi la conception classique des théories scientifiques pourrait constituer un exemple paradigmatique de cadre conceptuel, il est nécessaire d'analyser les liens logiques que l'on peut établir entre cette dernière et les thèses auxquelles se résume la conception scientifique du monde que présente le manifeste du Cercle de Vienne. Le but d'une telle analyse consiste, notamment, à déterminer la façon dont les thèses fondamentales qui sont propres à cette vision particulière du monde peuvent se mêler aux présupposés et aux thèses qui distinguent telle ou telle théorie, lorsque cette dernière est reconstruite sous la forme d'un système d'énoncés partiellement interprétés.

Cela dit, en quoi consistent de telles thèses ? Quel rôle ont-elles joué dans l'élaboration de la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne ? En quoi consiste la vision de la science, en tant que corps de connaissances, qu'elles ont permis d'élaborer ? En quoi sont-elles liées à la conception classique des théories scientifiques ? Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier temps (section 1.1), en quoi la conception scientifique du monde qui caractérisait le Cercle de Vienne peut être interprétée comme étant la synthèse d'une vision empiriste des fondements des sciences de la nature et d'une vision conventionnaliste du caractère des concepts les plus abstraits

et des principes les plus généraux dont se servent ces mêmes sciences. Nous verrons, en outre, en quoi les thèses fondamentales que les tenants du Cercle de Vienne ont développées afin de justifier les présupposés mêmes d'une telle synthèse se résument à ce que Willard Van Orman Quine (1951, 1953) a appelé le « dogme de l'analyticité » et le « dogme du réductionnisme ». Dans un second temps (section 1.2), nous verrons également en quoi la manière dont Rudolf Carnap (1928, 1932b, 1934, 1936a) s'est approprié ces deux « dogmes de l'empirisme » (« *dogmas of empiricism* ») (Quine 1951, 1953) l'a amené à développer, tout au long des années 1930, une conception de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique comme tâche fondamentale de la philosophie, en tant que théorie de la connaissance, d'une part, et des sciences empiriques, d'autre part, que l'on pourrait qualifier de « syntaxique » (« *syntaktisch* », « *syntactic* »), contrairement à l'interprétation qu'en a donnée Quine (1951, 1953) lui-même. Comme nous l'avons anticipé plus haut, nous montrerons, en outre, en quoi une telle conception syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique s'est traduite, par la suite, par une vision de la science, en tant que corps de connaissances, comme système des énoncés qui relèvent d'un « langage universel de la science », défini sur le modèle d'une reconstruction purement syntaxique du « langage de la physique » (Carnap 1932b). Cet aboutissement a, néanmoins, soulevé la question de savoir quelles sont les modalités par lesquelles l'on pourrait déterminer, d'une manière qui soit empiriquement fondée, le sens des énoncés et la signification des mots dont se compose un tel langage universel. C'est pourquoi, dans un troisième moment (section 1.3), nous verrons en quoi une telle question a conduit Carnap (1936b, 1937, 1945a) à approfondir la vision de la science comme système d'énoncés dont nous venons de parler, en la complétant par une double reconstruction syntaxique du « principe de l'empirisme » (« *principle of empiricism* ») (Carnap 1936b, 1937) et du principe d'induction à partir du concept de « degré de confirmation » (« *degree of confirmation* »). Cela nous permettra d'en conclure, par la suite, que l'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, ainsi que de la théorie de la connaissance, que Carnap (1928, 1932b, 1934) avait développée au cours des années 1930 a fini par aboutir à une conception de la science, en tant que corps de connaissances, non seulement comme système d'énoncés, mais également comme « cadre linguistique » (Lutz 2012), dont il est également possible de se servir pour caractériser la conception classique des théories scientifiques, ce qui soulève, néanmoins, la question suivante : en quoi consisterait, plus concrètement, la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre linguistique ?

1.1 Le *Manifeste du Cercle de Vienne* et le problème de l'empirisme

Afin de mieux identifier ce en quoi consistent les thèses caractéristiques de la conception scientifique du monde qu'a développée le Cercle de Vienne, il est nécessaire de situer une telle vision du monde dans le contexte historique où elle a vu le jour, c'est-à-dire dans le contexte de la crise du matérialisme mécaniste qui avait dominé la pensée scientifique au cours du XIX^e siècle. Comme a pu l'observer Philipp Frank (1949) – l'un des fondateurs du premier groupe du Cercle de Vienne – dans un essai qu'il a consacré à la science moderne et à sa philosophie, « deux convictions caractéristiques [*'two characteristic beliefs'*] de la science du XIX^e siècle se sont effondrées au cours des dernières décennies de sa vie », à savoir « la conviction qu'il serait possible de réduire tous les phénomènes naturels aux lois de la mécanique [*'all phenomena in nature can be reduced to the laws of mechanics'*], et la conviction que la science finirait par révéler la 'vérité' sur la nature de l'univers [*'science will eventually reveal the 'truth' about the universe'*] » (Frank 1949, p. 4). En effet, c'est fort du constat de cette double crise que l'électrophysiologiste berlinois Emile Du Bois-Reymond (1872) avait pu déclarer publiquement, lors d'un congrès de scientifiques et de médecins de langue allemande qui s' était tenu à Leipzig en 1872, que la « connaissance scientifique de la nature » (« *Naturerkennen* ») visant à ramener tout changement dans le monde physique à des mouvements d'atomes (« *Bewegungen von Atomen* ») et à l'action constante de forces centrales (« *von der Zeit unabhängige Zentralkräfte* ») (Du Bois-Reymond 1872, p. 442) avait désormais atteint ses limites. Toujours à l'avis de Du Bois-Reymond (1872), ces dernières consistaient précisément dans l'impossibilité « transcendante » (« *transzendent* ») de justifier les fondements théoriques des sciences mécanistes de la nature (à savoir les concepts mêmes d'atome, de force et de mouvement) par les moyens qui étaient propres à ces dernières, ainsi que d'utiliser ces mêmes moyens pour rendre compte de phénomènes psychophysiologiques complexes, tels que la conscience (« *Bewußtsein* »). Cet aveu d'échec a, néanmoins, fini par engendrer, dans les milieux culturels de l'époque, des mouvements de réaction qui étaient de signe opposé, mais qui partageaient le même objectif de fond, c'est-à-dire l'objectif d'éclaircir la relation qui existe entre l'expérience empirique et les théories scientifiques, conçues comme étant des systèmes de concepts abstraits et de lois universelles (Suppe 1977 ; Rheinberger 2007). Ces mouvements se sont ainsi cristallisés autour d'un certain nombre d'options philosophiques alternatives, qui ont constitué l'horizon historico-philosophique dans lequel se sont inscrits, tout au long du XX^e siècle, différents questionnements sur la nature de la réalité, telle qu'elle se manifeste aux hommes par l'intermédiaire de la connaissance scientifique, ainsi que sur les fondements et les conditions de possibilité d'une telle connaissance. Parmi toutes ces options, les principales étaient, notamment, le renouveau de l'idéalisme transcendantal que promouvaient les

néokantiens de l'École de Marbourg, le retour à l'empirisme que prônait Ernst Mach (1883), ainsi que les thèses conventionnalistes que défendaient Henri Poincaré (1902, 1905), Pierre Duhem (1906) et Abel Rey (1907). Cela dit, en quoi consistaient, plus précisément, toutes ces différentes positions philosophiques et en quoi se sont-elles opposées les unes aux autres ? De quelle manière la conception scientifique du monde qu'ont développée les membres du Cercle de Vienne, et plus généralement les tenants de l'empirisme logique, s'est-elle rapportée aux arguments des néokantiens de l'École de Marbourg, ainsi qu'à ceux de l'empirisme de Mach (1883, 1886, 1905) ou à ceux des conventionnalistes français ? En quoi ce contexte historico-philosophique a-t-il fini par façonner les thèses fondamentales qui ont caractérisé une telle conception ?

Afin de répondre à de telles questions, nous pouvons partir de la manière dont les scientifiques et les philosophes liés à l'École néokantienne de Marbourg, comme Hermann Cohen (1871, 1883, 1902), Paul Natorp (1910, 1912) et, du moins pour une partie de sa carrière, Ernst Cassirer (1906, 1907, 1921, 1923-1929), ont essayé de franchir l'interdit qu'avait posé Dubois-Reymond (1872). Ces derniers ont tâché, en effet, de soumettre les concepts et les méthodes des sciences mécanistes de la nature à une « critique transcendantale » (« *transzendente Kritik* ») renouvelée, dont le but était de renverser le point de vue des néokantiens « empiristes », tels Hermann von Helmholtz (1921) et Friedrich Albert Lange (1866), qui avaient fait coïncider le sujet transcendantal avec la forme d'« organisation psychophysique » (« *physisch-psychische Organisation* ») caractéristique de l'espèce humaine. Contrairement à ces derniers, les néokantiens de l'École de Marbourg visaient, ainsi, à revenir aux sources transcendantales de la critique de la raison pure – conçue comme « évaluation de la valeur ou de la non-valeur...de la connaissance pure et *a priori*, ainsi que de ses éléments » (« *Beurteilung von Wert oder Unwert...apriorischer, reiner Erkenntnis und Erkenntniselemente* ») (Eisler 1994, p. 314) – tout en conservant les acquis de la « science mathématique de la nature » (« *mathematische Naturwissenschaft* ») du XIX^e siècle, si bien que ce qu'ils prônaient n'était tout de même pas un pur et simple retour à Kant (1787). Autrement dit, leur but était de montrer en quoi des concepts tels ceux d'atome, de force et de mouvement ne seraient pas autre chose que des corrélats objectifs d'« idéalités mathématiques » (« *mathematische Idealitäten* ») – comme, par exemple, les fluxions du calcul différentiel –, qui feraient l'objet de ce que Cohen (1902) lui-même appelait la « logique de la connaissance (rationnelle) pure » (« *Logik der reinen Erkenntnis* »), et qui relèveraient donc d'un système de « principes synthétiques *a priori* » (« *synthetische Prinzipien a priori* »). Plus précisément, par « principes synthétiques *a priori* », Cohen (1902) et les autres membres de l'École de Marbourg entendaient des principes qui permettraient d'accroître notre connaissance de la réalité, tout en étant indépendants de l'expérience empirique, et qui constitueraient les conditions mêmes de la possibilité de cette dernière, du moins

telle qu'elle se manifestait, à cette époque-là, au prisme de la physique mécaniste²⁶. En conséquence, Cohen (1902) maintenait non seulement que la tâche de déterminer les conditions de possibilité de la connaissance objective incomberait à la logique de la connaissance rationnelle pure, c'est-à-dire à la philosophie critique, mais également que « *la pensée de la connaissance* [*das Denken der Erkenntnis*] *ne peut être décrite, définie, découverte, mesurée et forgée qu'à partir exclusivement des problèmes de la connaissance scientifique* [*Probleme der wissenschaftlichen Erkenntnis*] » (Cohen 1902 ; Cohen *et al.* 2000, p. 92) (Cassirer 1912 ; Poma 1997 ; Cassirer *et al.* 1998 ; Cohen *et al.* 2000 ; Dufour 2000, 2001, 2003 ; Munk 2005 ; Beiser 2015). Nous pouvons donc en conclure que la conception des fondements du savoir que défendaient les néokantiens de l'École de Marbourg consistait à subsumer l'expérience empirique sous les lois universelles qui sont au fondement des théories scientifiques, en tant que principes synthétiques *a priori* qui constitueraient les conditions mêmes de la possibilité de toute expérience empirique, du moins telle qu'elle se réalise par l'intermédiaire des méthodes et des concepts qui relèvent des sciences (mathématiques) de la nature²⁷.

²⁶ « Ainsi, du point de vue de la connaissance [*für die Erkenntnis*], la 'nature' doit-elle être nécessairement conçue comme un système de mouvements dont les processus sont liés les uns aux autres en fonction de lois [*ein System von Bewegungsvorgängen, die in gesetzlichem Zusammenhang mit einander stehen*], avant de pouvoir compter sur elle comme sur un donné stable [*mit einem festen Datum*] lors de la fondation. Lorsque le matérialisme dogmatique cherche à réduire la pensée à un cas particulier de la mécanique [*der dogmatische Materialismus den Gedanken als einen Spezialfall der Mechanik abzuleiten sucht*], cette conception n'a besoin que d'être menée jusqu'à son terme pour subir aussitôt une réorientation spécifique [*eigentümliche Rückwendung*]. Car la mécanique elle-même ramène, si son concept [*ihr Begriff*] n'est pas utilisé dans la pleine obscurité d'une formule vulgarisée mais avec la précision de sa signification scientifique [*in der Schärfe seiner wissenschaftlichen Bedeutung*], à des facteurs mathématiques, c'est-à-dire *idéels* [*auf mathematische, d. h. auf ideelle Grundfaktoren*]. On ne peut exprimer ce qu'est le mouvement [*Bewegung*] autrement que par des concepts de grandeur [*nicht anders als in Grössenbegriffen*] : mais, pour être compris, ceux-ci présupposent le système fondamental de la théorie pure des grandeurs [*Grundsystem der reinen Grössenlehre*]. Ainsi les principes et les axiomes des mathématiques [*die Prinzipien und Axiomen der Mathematik*] deviennent-ils le fondement véritable [*das eigentliche Fundament*] qu'il faudra considérer comme certain pour donner sens et stabilité à un quelconque énoncé physique sur la réalité [*irgend eine naturwissenschaftliche Aussage über die Wirklichkeit*] » (Cassirer 1912 ; Cassirer *et al.* 1998, p. 23).

²⁷ Comme le soutient Michael Friedman (1996), dans sa reconstruction du rôle qu'a joué la critique des thèses de Martin Heidegger (1927, 1929) dans le développement de la philosophie de Rudolf Carnap (1932a), bien qu'ils aient fini tous les deux par prendre leurs distances du néokantisme, l'opposition entre ces deux auteurs recoupe celle entre les différentes écoles néokantiennes qui les ont marqués dans leur jeunesse, à savoir, respectivement, l'École de Baden (ou École du sud-ouest) et l'École de Marbourg. Comme nous venons de le voir, la seconde « mettait l'accent sur l'importance des mathématiques et des sciences naturelles [*the importance of mathematics and natural science*], et considérait, par conséquent, que le véritable acquis de la *Critique de la raison pure* avait consisté à jeter les bases de la physique mathématique newtonienne [*a laying of the groundwork for Newtonian mathematical physics*] », alors que la première,

Par conséquent, c'est précisément en opposition à cette critique transcendantale des fondements des sciences naturelles, d'inspiration néokantienne, qu'Ernst Mach (1883, 1886, 1905) a tâché d'éclaircir les liens qui existent entre l'expérience concrète que nous pouvons faire de la réalité qui nous entoure, d'une part, et les principes les plus abstraits des sciences de la nature, d'autre part, en réduisant les seconds à la première. Pour ce faire, il a prôné une vision empiriste de la connaissance, dont le but était, précisément, de réduire tous les concepts de la physique à leur fondement ultime, c'est-à-dire la sensation (« *Empfindung* »). C'est ainsi que, dans son « exposé historique et critique » (« *historisch-kritische Darstellung* ») des principes de la mécanique, Mach (1883) présente cette dernière comme étant un exemple paradigmatique de la manière dont se constituerait le savoir scientifique : « la connaissance instinctive, involontaire des phénomènes de la nature [*die instinctive unwillkürliche Kenntniss der Naturvorgänge*] précède toujours leur connaissance consciente, scientifique [*die willkürliche wissenschaftliche Kenntniss*], c'est-à-dire la connaissance des phénomènes [*die Erforschung der Erscheinungen*] » (Mach 1883 ; 1904, p. 7). De cette manière, Mach (1883) visait à établir un lien génétique entre la nécessité évolutive qu'aurait éprouvée l'espèce humaine de satisfaire certains de ses besoins vitaux et l'acquisition, par le biais d'expériences aveugles, des connaissances préalables à la formulation de théories scientifiques, pour ainsi dire, « en bonne et due forme ». Ces connaissances préalables auraient donc été systématisées et transformées, par la suite, en de véritables connaissances scientifiques lorsque, au fur et à mesure que la société s'est complexifiée, aurait émergé un corps de savants professionnels, dont la reproduction sociale aurait nécessité la transmission du savoir ainsi acquis. En conséquence, c'est précisément dans le but de simplifier la communication et la transmission de connaissances portant sur tel ou tel phénomène que les hommes auraient été amenés à repérer des régularités dans la nature et à ramener tous les phénomènes observés à un petit nombre de catégories fondamentales, en associant le semblable au semblable. Au fur et à mesure qu'une telle classification se serait faite à la fois plus exhaustive et plus précise, les hommes auraient donc fini par prendre l'habitude de réduire l'inconnu au connu, l'étrange au familier, ce que Mach (1883) considérait comme étant, justement, la véritable nature de l'explication scientifique (« *Erklärung* »). Ce faisant, poursuit-il, les hommes seraient donc parvenus à se faire « *une conception des faits synoptique, unitaire, logique et adéquate* » (« *übersichtliche, einheitliche, widerspruchslose und mühelose Erfassung der Thatsachen* ») par « un processus

fondée par Wilhelm Windelband (1892) et développée de manière systématique par Heinrich Rickert (1899), « mettait l'accent sur l'importance prééminente [*the distinctive importance*] des *Geisteswissenschaften* [c'est-à-dire les sciences de la culture] et consacrait, par conséquent, des efforts philosophiques considérables à l'établissement d'une distinction méthodologique nette [*a sharp methodological distinction*] entre ces dernières et les *Naturwissenschaften* [c'est-à-dire les sciences de la nature] » (Friedman 1996, p. 54).

d'adaptation de la pensée aux choses » (Mach 1883 ; 1904, p. 12). C'est précisément en cela que consisterait « l'économie dans la communication et la conception » (« *Ökonomie der Mittheilung und Auffassung* ») – et donc « l'économie de la pensée » (« *Denkökonomie* ») – que Mach (1883) considérait, encore une fois, comme étant « l'essence de la science » (« *Wesen der Wissenschaft* ») (Mach 1883 ; 1904, p. 12)²⁸ (Cohen & Seeger 1970 ; Machamer & Turnbull 1976 ; Haller & Stadler 1988 ; Rheinberger 2007 ; Pojman 2019). Une telle conception de la science visait, par conséquent, aussi bien à expliquer la genèse des connaissances scientifiques qu'à en justifier la validité sur des bases purement empiriques. Elle soulevait néanmoins une question cruciale : si l'on accepte la thèse que les lois fondamentales des sciences naturelles, et notamment celles de la physique, ne seraient rien d'autre que des descriptions abrégées et économiques de vastes ensembles de perceptions, comment pourrait-on rendre compte du haut degré d'abstraction et de généralité qui semble les distinguer des simples descriptions de régularités empiriques ?

C'est précisément comme une tentative d'apporter des solutions à un tel problème que nous pouvons interpréter les thèses conventionnalistes que défendaient, comme nous l'avons vu plus haut, Henri Poincaré (1902, 1905), Pierre Duhem (1906) et Abel Rey (1907), en ceci que leur but affiché était précisément de sauver le caractère abstrait et général des lois physiques sans pour autant les considérer comme des principes qui seraient constitutifs de notre cognition de la réalité en tant que telle, c'est-à-dire comme des principes synthétiques *a priori* au sens kantien et néokantien du terme. Bien que leurs positions ne fussent pas exactement les mêmes, ces derniers s'accordaient, en effet, pour regarder la connaissance de tout phénomène naturel comme étant déterminée non pas par des conditions de possibilité *a priori*, mais par les conventions qu'établissent les observateurs afin d'attribuer une signification aux mots qu'ils utilisent pour décrire et pour expliquer le phénomène en question (Frank 1949 ; Rheinberger 2007 ; Rescorla 2019). Dans *La Science et l'hypothèse*, Poincaré (1902) affirme, par exemple, que l'expérience constitue la seule source d'informations sur la nature, ainsi que la seule source de certitude dans la connaissance, qui soit à notre disposition. Nonobstant cela, poursuit-il, « les faits tout nus ne sauraient... nous suffire » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 159), car,

²⁸ « Ainsi donc la science de la nature se propose de rechercher ce qu'il y a de constant dans les phénomènes, les éléments de ceux-ci, le mode de leur assemblage et leur dépendance mutuelle [*die Elemente derselben und die Art ihrer Verbindung, ihrer Abhängigkeit voneinander*']. Elle s'efforce, par une description générale et complète [*die übersichtliche und vollständige Beschreibung*'], de rendre inutiles des expériences nouvelles, de les épargner [*dieselben zu ersparen*'], par exemple lorsque la connaissance de la dépendance mutuelle de deux phénomènes fait que l'observation du premier rend inutile celle du second qui se trouve prédéterminé et codéterminé [*mibestimmt und vorausbestimmt*] par le premier. Mais dans la description elle-même on peut épargner du travail en y introduisant la méthode [*Methode*] et en cherchant à décrire le plus possible, en une fois et de la façon la plus courte [*in der kürzesten Weise zu beschreiben*'] » (Mach 1883 ; 1904, p. 13).

si l'on admet que l'un des buts fondamentaux de l'activité scientifique consiste à prévoir de nouveaux phénomènes, force en est de constater que toute prédiction implique, *a minima*, d'établir un rapport d'analogie entre des événements qui ne sont pas en tout point identiques, et donc d'opérer une première forme de généralisation. Pour généraliser, il est, cependant, nécessaire d'émettre des hypothèses qui permettent de donner un ordre aux observations, en établissant des rapports d'analogie, entre ces dernières, qui sont de plus en plus étendus, jusqu'à ce qu'on ne finisse par bâtir un véritable système de classification des relations (qualitatives et quantitatives) qui existent entre les données sensibles. En mécanique classique, par exemple, les physiciens commencent par établir des vérités expérimentales qui sont « vérifiées d'une façon très approchée en ce qui concerne des systèmes presque isolés », qu'ils généralisent, par la suite, afin d'en tirer des « postulats applicables à l'ensemble de l'univers et regardés comme rigoureusement vrais » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 151). De tels postulats ne sont, cependant, pas autre chose que « des conventions et des définitions déguisées », tout comme les axiomes de la géométrie euclidienne²⁹, bien qu'il soit possible de leur attribuer, tout de même, « une valeur absolue » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 151). La raison en est que, pour les formuler, on suit les indications que fournissent un certain nombre d'expériences, si bien qu'il est raisonnable de croire qu'aucun nouveau phénomène ne viendra les contredire³⁰. Contrairement aux axiomes de la géométrie, c'est-à-dire contrairement à des conventions qui n'ont rien à voir avec la nature des expériences d'où on les a tirées – en ceci que les secondes étaient des expériences physiques (des expériences de mécanique, d'optique, etc.) qui portaient sur des objets empiriques qu'il était possible de percevoir par les sens, alors que les premiers sont des principes mathématiques qui portent sur des objets abstraits, dont l'existence ne dépend que d'un tissu de relations logiques entre concepts –, les postulats fondamentaux de la mécanique classique sont des

²⁹ « Les axiomes géométriques ne sont donc ni des jugements synthétiques a priori ni des faits expérimentaux. Ce sont des conventions ; notre choix, parmi toutes les conventions possibles, est guidé par des faits expérimentaux ; mais il reste libre et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction. C'est ainsi que les postulats peuvent rester rigoureusement vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives. En d'autres termes, les axiomes de la géométrie (je ne parle pas de ceux de l'arithmétique) ne sont que des définitions déguisées » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 76).

³⁰ Sur ce point, les thèses de Poincaré (1902) diffèrent de celles de Duhem (1906), qui maintenait, en revanche, que « les lois de la Physique sont donc provisoires en ce que les symboles sur lesquels elles portent sont trop simples pour représenter complètement la réalité ; toujours il se trouve des circonstances où le symbole cesse de figurer les choses concrètes, où la loi cesse d'annoncer exactement les phénomènes ; l'énoncé de la loi doit donc être accompagné de restrictions qui permettent d'éliminer ces circonstances ; ces restrictions, ce sont le progrès de la Physique qui les font connaître ; jamais il n'est permis d'affirmer qu'un en possède l'énumération complète, que la liste dressée ne subira aucune addition ni aucune retouche » (Duhem 1906 ; 2007, p. 247).

conventions « qui portent bien sur les mêmes objets » que ceux des expériences qui en ont démontré l'utilité, voire « sur des objets analogues », si bien que, dans une telle discipline, « les principes conventionnels et généraux sont la généralisation naturelle et directe des principes expérimentaux et particuliers » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 152). En conséquence, il est aisé de comprendre en quoi, par sa conception des fondements de la mécanique, Poincaré (1902) se démarquait à la fois de l'idéalisme transcendantal des néokantiens de l'École de Marbourg et de l'empirisme de Mach (1883) : d'une part, il considérait le temps absolu de la mécanique newtonienne et l'espace de la géométrie euclidienne comme étant non pas des principes synthétiques *à priori*, mais de simples conventions ; d'autre part, il maintenait également que les principes abstraits de la mécanique, et *a fortiori* ses postulats fondamentaux, ne sauraient se réduire à des descriptions de faits expérimentaux. Cela dit, si l'on admet que la généralité et la certitude des principes généraux des sciences naturelles découlent, comme l'affirmait Poincaré (1902, 1905), de leur caractère conventionnel, quoique non pas absolument arbitraire, en quoi pourrait-on caractériser, de manière rigoureuse et systématique, les liens que ces mêmes principes entretiennent avec les observations et les expériences empiriques dont ils sont issus ?

C'est précisément à une telle question qu'ont répondu les membres du Cercle de Vienne en développant leur conception scientifique du monde, c'est-à-dire une conception de la réalité telle qu'elle se manifeste au prisme des sciences de la nature (ou plus généralement des sciences empiriques), ainsi que des conditions de possibilité de ces mêmes sciences, qui reposait sur deux présupposés fondamentaux. Premièrement, elle reposait sur le présupposé que le concept même de « principe synthétique *a priori* », et donc également la conception des conditions de possibilité du savoir scientifique qu'avait développée l'École néokantienne de Marbourg, ne serait rien d'autre qu'une contradiction dans les termes. Les empiristes logiques considéraient, en effet, qu'il existerait une différence essentielle entre « les composants empiriques [c'est-à-dire synthétiques] de la science » (« *die empirischen Bestandteile* ») et ses « composants purement conventionnels » (« *die bloß konventionelle* »), c'est-à-dire les composants de la science qui ne résultent pas directement d'observations empiriques et qui sont donc de nature *a priori*. Une telle différence se concrétiserait, en outre, du point de vue de la structure des théories scientifiques, dans une distinction entre des énoncés qui sont factuels, en ceci qu'ils sont doués d'un véritable « contenu » (« *Aussagegehalt* »), et de simples « définitions » (« *Definitionen* »), qui énoncent les propriétés purement formelles que possède tel ou tel concept (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez 2010, p. 118). Autrement dit, bien qu'ils vissent de bon œil la tentative de « logicisation de l'objet de la connaissance empirique » (« *logicization of the object of empirical knowledge* ») (Friedman 1996) qu'avaient menée Hermann Cohen (1902) et ses collègues, en élevant la physique mathématique au rang de science naturelle par excellence, les

tenants de l'empirisme logique récusait l'idée qu'il existerait des principes de la connaissance et des formes de l'expérience qui constitueraient des éléments inchangeables de l'architecture des facultés cognitives humaines. Ils tâchaient, en revanche, « d'envisager [ces mêmes principes et] ces mêmes formes comme évoluant en accord avec l'évolution de la science » (« *construe these forms as subject to an evolution that would be in accord with the evolution of science* ») (Frank 1949, p. 8). C'est pourquoi, deuxièmement, la conception scientifique du monde que prônaient les membres du Cercle de Vienne se fondait également sur l'idée qu'il serait possible de réconcilier l'empirisme d'Ernst Mach (1883, 1886, 1905) avec les thèses des conventionnalistes français, en élaborant une synthèse de leurs visions respectives non seulement des structures et des contenus des théories, mais également de la dynamique de croissance du savoir scientifique lui-même (Rheinberger 2007). Plus précisément, le but d'une telle synthèse était de combler le fossé qui existait entre une conception empiriste des fondements de la connaissance scientifique et une conception des principes relevant de la logique symbolique et des mathématiques comme étant des vérités analytiques – et donc comme étant irréductibles à de simples descriptions abrégées et économiques de quelques complexes de sensations – dans le but d'utiliser les seconds pour éclairer les premiers (Uebel 1996 ; Stadler 2007). Comme a pu l'observer, encore une fois, Philipp Frank (1949), l'empirisme de Mach (1883) semblait sous-évaluer, aux yeux des membres du Cercle de Vienne, non seulement le fait que « les principes de la science contiennent des relations mathématiques, simples et bien définies, entre un petit nombre de concepts [*'simple clear-cut mathematical relations among a small number of concepts'*] » – par opposition aux multiples connexions entre concepts vagues qui caractérisent les simples compte rendus d'observations empiriques –, mais également l'importance du rôle que joue le raisonnement déductif « dans la découverte et dans la présentation de ces mêmes principes » (« *in the discovery and presentation of these principles* ») (Frank 1949, p. 8). C'est pourquoi il était nécessaire, toujours aux yeux des membres du Cercle de Vienne, de compléter la conception empiriste des sciences qu'incarnait la philosophie de Mach (1883) par une conception des « principes généraux de la science » (« *general principles of science* ») que l'on peut exprimer sous la forme d'énoncés logiques ou mathématiques – tels que, par exemple, la loi d'inertie ou le principe de conservation de l'énergie – comme étant « de libres créations de l'esprit humain qui n'ont rien à dire au sujet des faits observés » (« *free creations of the human mind which do not tell anything about observed facts* ») (Frank 1949, p. 12). Dans une telle perspective, ces mêmes principes généraux ne serviraient donc qu'à déterminer la manière dont on peut utiliser tel ou tel concept de façon logiquement consistante, ce qui était précisément la position que défendaient les conventionnalistes français. Cela dit, les membres du Cercle de Vienne n'entendaient pas se limiter à développer la conception de la nature des hypothèses et des conventions scientifiques qu'avait déjà mise en avant, par exemple, Henri Poincaré (1902,

1905), puisqu'ils visaient à utiliser les outils de la logique moderne – tels que les présentait les *Principia Mathematica* (Whitehead & Russell 1910, 1912, 1913) et le *Tractatus logico-philosophicus* (Wittgenstein 1922) – afin d'éclaircir non seulement ce en quoi consistent ces mêmes hypothèses et ces mêmes conventions, mais également la manière dont il serait possible de leur attribuer une signification empirique, quoique partielle. Cela dit, en quoi les thèses fondamentales qu'ont développées les tenants de l'empirisme logique, afin d'atteindre un tel but, permettent-elles de justifier la validité des présupposés que nous venons de décrire ?

Pour traiter cette autre problématique, nous pouvons prendre comme point de départ la manière dont Quine (1951, 1953) a présenté ces mêmes thèses fondamentales, en les résumant à deux « dogmes », à savoir, justement, le « dogme de l'analyticité » et le « dogme du réductionnisme » (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 93). Mais en quoi consistent, plus précisément, ces « deux dogmes de l'empirisme » (Quine 1951, 1953) ? En ce qui concerne le dogme de l'analyticité, ce dernier repose sur l'idée que tout énoncé qui fait une assertion « cognitivement significative » (« *cognitively significant* ») – c'est-à-dire tout énoncé dont on peut dire qu'il est vrai ou qu'il est faux – est soit un « énoncé analytique » (« *analytic statement* ») – c'est-à-dire une tautologie³¹ – ou une contradiction, et possède donc « une signification ou un sens purement logique » (« *purely logical meaning or significance* »), soit un « énoncé synthétique » (« *synthetic statement* »), c'est-à-dire un énoncé « susceptible, au moins en principe, d'être confronté à un test expérimental » (« *capable, at least potentially, of test by experiential evidence* »), et dont on peut affirmer, par conséquent, qu'il a

³¹ Il faut cependant rappeler que, à la suite d'objections telles que celles qu'avait soulevées Quine (1951, 1953) dans son analyse critique des dogmes de l'empirisme, Carnap (1966) a fini par reconnaître l'existence de deux types d'énoncés analytiques : d'une part, les énoncés qui sont « logiquement vrais » ou « logiquement faux », c'est-à-dire « L-vrais » (« *L-true* ») ou « L-faux » (« *L-false* »), et dont la vérité ne dépend, par conséquent, que de leur forme logique et de la signification des termes logiques – notamment de ceux qui désignent des connecteurs logiques – qu'ils contiennent, tels que l'énoncé « si tout électron possède un moment magnétique et la particule *a* ne possède pas de moment magnétique, alors la particule *a* n'est pas un électron » – c'est-à-dire un énoncé dont la forme logique est « $(\forall x (E(x) \rightarrow M(x)) \wedge \sim M(a)) \rightarrow \sim E(a)$ », où « *E(x)* » signifie « la particule *x* est un électron » et « *M(x)* » signifie « la particule *x* possède un moment magnétique », et donc un énoncé qui resterait toujours vrai quand bien même l'on attribuerait aux termes descriptifs « *E(x)* » et « *M(x)* » des significations complètement différentes, comme, par exemple, « l'individu *x* est célibataire » et « l'individu *x* est heureux » ; d'autre part, les énoncés qui sont « (analytiquement) vrais par convention » ou « (analytiquement) faux par convention », c'est-à-dire « A-vrais » (« *A-true* ») ou « A-faux » (« *A-false* »), et dont la vérité dépend non pas de leur forme logique, mais de la signification qu'on assigne aux termes qu'ils contiennent, y compris les termes descriptifs, tel l'énoncé « aucun célibataire n'est en couple » – c'est-à-dire un énoncé qui est analytiquement vrai aussi longtemps que le terme « célibataire » est considéré comme étant synonyme de « personne qui n'est pas en couple », mais qui devient synthétique lorsqu'on définit le terme « célibataire », de manière plus spécifique, comme signifiant « personne qui n'est pas mariée » (Carnap 1966 ; 1973, p. 258-259).

une « signification ou un sens empirique » (« *empirical meaning or significance* ») (Hempel 1965 ; Jacob 1980b, p. 63). Il en découle que toute vérité, en tant qu'énoncé doué de signification cognitive dont on peut dire qu'il est vrai, doit appartenir, de manière non ambiguë, soit à l'une, soit à l'autre catégorie, si bien qu'il existerait un « clivage profond » (« *fundamental cleavage* ») entre les vérités purement logiques, c'est-à-dire « analytiques » (« *analytic truths* »), et les vérités empiriques, c'est-à-dire « synthétiques » (« *synthetic truths* »), ce qui constitue, précisément, le contenu du dogme de l'analyticité tel que le définissait Quine (1951, 1953). Quant au dogme du réductionnisme, en revanche, il est étroitement lié à un autre des principes fondateurs de l'empirisme logique, c'est-à-dire « la théorie vérificationniste de la signification » (« *verification theory of meaning* »), d'après laquelle « la signification d'un énoncé est la méthode par laquelle ce dernier est empiriquement confirmé ou infirmé [*the meaning of a statement is the method of empirically confirming or infirming it*']. Un énoncé analytique est ce cas limite, qui est confirmé quoi qu'il arrive dans toutes les circonstances » (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 111). Cette théorie de la signification implique, par conséquent, que le sens de tout énoncé non analytique dépend d'un certain « critère de signification empirique » (« *criterion of empirical significance* ») (Hempel 1965) que l'on peut interpréter, du moins au premier abord, comme étant un critère de vérifiabilité au moyen d'observations ou d'expériences, en principe, possibles³² et qui permet de départager, sur le modèle de la tripartition sémantique qu'effectue Ludwig Wittgenstein (1922) dans le *Tractatus logico-philosophicus*, les énoncés qui sont « pourvus de sens » (« *sinnvoll* », « *which have a sense* ») – et qui décrivent ainsi des « états de choses » (« *Sachverhalte* », « *states of affairs* ») du monde réel, en tant que configurations d'objets simples, qui sont, quant à eux, directement « dénotés » (« *bedeutet* », « *meant* ») par des noms propres (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 43) –, les énoncés qui sont « vides de sens » (« *sinnlos* », « *which lack sense* »), tels les tautologies et les contradictions – car, tout en ayant une signification cognitive, ils ne s'appliquent à aucun domaine d'objets empiriques et ne sont, par conséquent, pas des « images du monde » (« *pictures of the world* ») –, et les énoncés qui sont tout

³² Comme a pu le préciser Rudolf Carnap (1956a), « même à l'époque du Cercle de Vienne, nous n'interprétons pas le principe de vérifiabilité [*the principle of verifiability*'] dans un sens étroit [*in this narrow sense*']. Nous mettons l'accent sur le fait que le principe nécessitait, non pas la possibilité effective de déterminer si un énoncé est vrai ou faux [*not the actual possibility of determination as true or false*'], mais seulement la possibilité *en principe* [*the possibility in principle*'] de faire cela. En faisant cette précision, nous avons l'intention de déclarer admissibles tous les cas où l'on serait empêché de déterminer la vérité ou la fausseté de tel ou tel énoncé seulement par des difficultés techniques ou par la distance dans l'espace ou dans le temps [*because of technical difficulties or remoteness in space or time*'] » (Carnap 1956a, p. 61).

simplement « dépourvus de sens » (« *unsinnig* », « *nonsensical* ») (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 68)³³ – en ceci qu’elles contiennent des signes qui n’ont aucune signification, ni empirique, ni logique –, tels que, justement, les énoncés métaphysiques (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 112). Cela dit, en quoi une telle théorie de la signification se rapporte-t-elle au dogme du réductionnisme ? Encore une fois, c’est Quine (1951, 1953) qui nous permet de répondre à la question que nous venons de poser, lorsqu’il observe que la théorie vérificationniste de la signification comporte nécessairement une certaine conception de « la nature de la relation entre un énoncé et les expériences qui contribuent à accroître ou diminuer sa confirmation » (« *the nature of the relation between a statement and the experiences which contribute or detract from its confirmation* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 112), en ceci qu’elle part du présupposé que ce sont ces mêmes expériences qui déterminent la signification de l’énoncé en question. Il en découle que tout énoncé non analytique qui soit doué d’une signification cognitive doit être tel qu’on puisse établir, du moins en puissance, une relation directe entre ce dernier et quelques données de l’expérience, c’est-à-dire tel qu’on puisse le traduire, d’une manière précise et identifiable, dans « une langue des données sensibles » (« *sense-datum language* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 112), d’où en découle précisément ce que Quine (1951, 1953) considérait comme étant le contenu du dogme du réductionnisme, c’est-à-dire l’idée que « chaque énoncé [non analytique] doué de signification équivaut à une construction logique [*logical construct*] à partir de termes qui renvoient à l’expérience immédiate [*immediate experience*] » (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 93).

En conséquence, il est aisé de comprendre en quoi la conjonction de ces deux dogmes comporte logiquement non seulement la réfutation du concept, kantien et néokantien, de principe synthétique *a priori*, mais également la possibilité d’une synthèse entre une conception empiriste des fondements du savoir scientifique et une conception conventionnaliste des vérités logiques et mathématiques, ainsi que des principes généraux de la science qui reposent, précisément, sur de telles vérités. D’une part, le dogme de l’analyticité, comporte, en effet, que tous les énoncés qui ne sont pas complètement dépourvus de sens se subdivisent en deux classes mutuellement exclusives, à savoir la classe des énoncés analytiques et celle des énoncés synthétiques. Il en découle que, si la signification de ces derniers n’est rien d’autre qu’une construction logique fondée sur des termes qui renvoient directement à quelques données sensibles, comme le comportent la théorie vérificationniste de la signification et le dogme du réductionnisme, alors tout énoncé qui soit doué de sens, mais dont la vérité ne dépende pas de l’expérience empirique, c’est-à-dire, justement, tout énoncé dont on puisse

³³ « 4.4611 – Mais la tautologie et la contradiction ne sont pas dépourvues de sens [*unsinnig*, ‘*lack sense*’] ; elles appartiennent au symbolisme [*part of the symbolism*], tout à fait à la manière dont le « 0 » appartient au symbolisme de l’arithmétique » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 68).

affirmer qu'il serait vrai de manière *a priori*, doit nécessairement appartenir, par exclusion, à la classe des énoncés analytiques. Autrement dit, il s'ensuit des deux dogmes de l'empirisme dont parlait Quine (1951, 1953) que tous les énoncés que l'on considère comme étant vrais de façon *a priori* sont soit analytiques, soit dépourvus de sens, alors que tous les énoncés synthétiques sont tels parce que le seul moyen de leur attribuer une signification cognitive consiste à prendre l'expérience empirique comme source de connaissance, ce qui implique, justement, que les contenus qu'expriment de tels énoncés sont nécessairement de nature *a posteriori*. D'autre part, la théorie vérificationniste de la signification et le dogme du réductionnisme impliquent également que le contenu de tout énoncé synthétique se réduit aux rapports qu'entretient ce dernier avec les données sensibles dont il est supposé être une représentation, et qui permettent ainsi d'en déterminer la vérité ou la fausseté, comme l'avait l'empirisme de Mach (1883). Néanmoins, comme la détermination de la signification empirique d'un énoncé synthétique est toujours partielle, vu que ces mêmes données sensibles se limitent à contribuer « à accroître ou diminuer [la] confirmation » de l'énoncé en question, et comme le dogme de l'analyticité comporte l'existence d'énoncés qui, étant de nature analytique, ne sont pas réductibles à des données immédiates des sens, la conception scientifique du monde propre à l'empirisme logique était, tout de même, en mesure de reconnaître le fait que le concept de signification cognitive ne saurait jamais coïncider, de manière parfaitement exhaustive, avec celui de signification empirique. Il en découle que, en vertu des conséquences que l'on peut déduire des deux dogmes qui la caractérisaient, la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne était à même de reconnaître la nature purement conventionnelle des principes les plus généraux des sciences, c'est-à-dire de reconnaître le fait que la signification de ces mêmes principes découle non pas d'observations empiriques directes, mais de l'existence de systèmes de relations formelles entre énoncés, comme l'affirmaient, précisément, Poincaré (1902, 1905) et Duhem (1906). Cela dit, en quoi le dogme de l'analyticité et le dogme du réductionnisme ont-ils structuré la vision du savoir scientifique, en tant que corps de connaissances, qu'ont fini par développer les membres du Cercle de Vienne sur la base de leur propre conception scientifique du monde – c'est-à-dire sur la base de la manière de concevoir la réalité telle qu'elle se montre au prisme des sciences naturelles, ainsi que les conditions de possibilité de ces mêmes sciences – que nous venons de décrire ?

1.2 Rudolf Carnap et la reconstruction rationnelle du savoir scientifique : de la science comme système de concepts à la science comme langage-système

Afin de montrer en quoi les deux dogmes de l'empirisme, tels que les a énoncés Quine (1951, 1953), ont pu façonner la vision du savoir scientifique, en tant que corps de connaissances, qui découle de la conception scientifique du monde qu'ont élaborée les membres du Cercle de Vienne, nous devons nous intéresser à la tradition philosophique plus vaste dans laquelle s'inscrit une telle vision. Mais en quoi consiste, par conséquent, cette tradition plus vaste ? Dans un article qui est considéré comme étant l'un des actes fondateurs de la philosophie analytique de la biologie (« *philosophy of biology* ») (Gayon 2009a), David L. Hull (1969) adresse une critique profonde aux différentes manières de soumettre les concepts et les méthodes des sciences biologiques à une analyse philosophique qui avaient dominé les débats sur la théorie de l'évolution, dans les milieux académiques anglophones, entre le début des années 1950 et la date à laquelle il écrivait. Hull (1969) stigmatisait, notamment, l'incompréhension réciproque entre philosophes et biologistes qui avait marqué ces mêmes débats, du moins à son avis, et il en identifiait l'une des causes principales dans l'outil fondamental dont s'étaient servis les philosophes qui avaient traité de problèmes conceptuels relatifs à la biologie et qui s'étaient inspirés, pour ce faire, de ce que Hans Reichenbach (1951) appelait « la philosophie scientifique » (« *scientific philosophy* »). Pour utiliser les mots mêmes de Hull (1969), cet outil n'était pas autre chose que « la reconstruction formelle [*formal reconstruction*] d'assertions biologiques dans la notation de la logique mathématique [*in the notation of mathematical logic*] » (Hull 1969, p. 173). Mais qu'entendait-il, plus précisément, par « reconstruction formelle » ? En première approximation, l'on pourrait caractériser la reconstruction formelle d'assertions scientifiques comme étant le résultat de l'application des formalismes et des méthodes d'analyse issus des développements qu'a connus la logique mathématique au cours du XX^e siècle (van Benthem 1982 ; Leitgeb 2011) à une conception de la philosophie comme analyse logique et justification rationnelle du savoir – notamment tel qu'il s'exprime sous la forme de jugements³⁴ –

³⁴ Kant (1787) définit, en effet, le jugement comme étant l'« unité de l'action » (« *Einheit der Handlung* »), autrement dite la « fonction » (« *Funktion* »), de l'entendement consistant à connecter (« *verknüpfen* ») les contenus de plusieurs représentations différentes (« *verschiedene Vorstellungsinhalte* ») d'un seul et même objet de l'expérience afin de les ramener à l'unité d'une « aperception en général » (« *Apperzeption überhaupt* »), sous la forme d'une « relation » (« *Verhältnis* ») entre un sujet (« *Subjekt* ») et un prédicat (« *Prädikat* ») qui constitue ce qu'on pourrait appeler, dans un langage plus moderne, un énoncé (Kant 1787, *A 68-69/B 93-94* ; 1980, p. 825-826). La théorie kantienne du jugement a été, par la suite, reprise et critiquée par des philosophes et des logiciens tels que Bolzano (1837), Franz Brentano (1874) et Frege (1892, 1918, 1919) (Bell 1979 ; Ricketts 1985, 1986a, 1986b ; Kremer 2000 ; Brandl 2018 ; Morscher 2018), si

qui est bien plus ancienne et dont on peut faire remonter l'origine jusqu'aux travaux de Bernard Bolzano (1837), John Stuart Mill (1843), Hermann von Helmholtz (1868) Gottlob Frege (1879) et Charles Sanders Peirce (1933) (van Benthem 2012), voire jusqu'à ceux d'Immanuel Kant (1787) (Maddy 2007)³⁵. D'après une telle conception, la philosophie consisterait, précisément, dans ce qu'on pourrait appeler la « reconstruction rationnelle », ou logique, du savoir, comme l'a expliqué Rudolf Carnap (1928) lui-même, lorsqu'il a écrit que, dans le domaine de la théorie de la connaissance (« *Erkenntnistheorie* »), « l'ensemble de la réalité que la connaissance construit d'une manière avant tout intuitive [*vorwiegend intuitiv vollzogen*'] est reconstruite rationnellement [*rationale Nachkonstruktion*'] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 188), contrairement à ce qui se passe dans celui de la psychologie, dont l'objet est précisément une telle construction, pour ainsi dire, « intuitive » et « immédiate » de la réalité³⁶. La « reconstruction formelle » dont parle Hull (1969) dans son article n'est donc rien d'autre que la « reconstruction rationnelle » telle que la concevaient Carnap (1928) et les autres tenants de l'empirisme logique, dont l'un des objectifs principaux était, notamment, de se servir de la logique mathématique pour mener à bien l'œuvre d'analyse logique et de justification rationnelle du savoir qu'avaient entamée, de manières différentes, les philosophes auxquels nous avons fait référence plus haut.

bien qu'elle a fini par constituer l'une des inspirations fondamentales de la conception de la philosophie comme analyse logique du langage et du savoir.

³⁵ Plus précisément, d'après la présentation qu'en fait Penelope Maddy (2007), nous pouvons en conclure que la reconstruction rationnelle du savoir telle que l'entendaient Carnap (1928) et Reichenbach (1938) consistait essentiellement dans une tentative de naturaliser l'« approche de la connaissance humaine 'à deux niveaux' » (« *two-level approach to human knowledge* ») qui avait caractérisé la philosophie critique d'Immanuel Kant (1787), c'est-à-dire la distinction entre « enquête empirique » (« *empirical inquiry* ») et « enquête transcendantale » (« *transcendental inquiry* »). Plus précisément, alors que Kant (1787) avait maintenu que les principes méthodologiques propres aux sciences elles-mêmes étaient « tout à fait convenables aux fins de l'enquête empirique » (« *entirely in order, for the purposes of empirical inquiry* »), mais que les enquêtes transcendantales nécessitaient le recours à une méthodologie proprement philosophique, quoique critique (Maddy 2007, p. 61-62), les tenants de l'empirisme logique considéraient que les méthodes des sciences, et notamment celles des sciences formelles, devaient s'appliquer à tous les niveaux d'enquête (Maddy 2007, p. 60-61).

³⁶ Dans sa définition de ce qu'il entendait par « philosophie scientifique », Hans Reichenbach (1938) a explicitement repris à son compte la distinction qu'avait dressée Carnap (1928), en écrivant, ainsi, que la psychologie s'intéresse à « la manière effective dont se déroulent les processus mentaux » (« *wie die Denkvorgänge wirklich ablaufen* »), tandis que la théorie de la connaissance a trait à « un substitut logique » (« *logischer Ersatz* ») de ces mêmes processus, et c'est précisément un tel substitut que l'on appelle « reconstruction rationnelle » (« *rationale Nachkonstruktion* ») (Reichenbach 1938, p. 2).

Par conséquent, c'est précisément dans cette tradition philosophique plus large, qui conçoit, réflexivement, la philosophie elle-même comme reconstruction rationnelle du savoir, que s'inscrit la vision de la connaissance scientifique qui découle de la conception du monde propre au Cercle de Vienne, et plus généralement au courant de l'empirisme logique. Une telle vision est, en effet, complémentaire à une conception de la philosophie comme consistant dans une théorie de la connaissance qui se sert des méthodes et des concepts des sciences elles-mêmes, et plus précisément des concepts et des méthodes de la logique et des mathématiques. Il en découle que, aux yeux des membres du Cercle de Vienne, la distinction entre la philosophie, conçue comme théorie de la connaissance, et les sciences empiriques, considérées comme consistant dans « *un système [unitaire] de connaissance conceptuelle* » (« *System begrifflicher Erkenntnis* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 293) – s'étageant sur plusieurs niveaux³⁷, mais portant sur un seul et même domaine d'objets, qui seraient, à leur tour, réductibles des objets plus fondamentaux – ne relevait pas d'une différence de nature, mais d'une différence de degré, en ceci que la première ne consisterait en rien d'autre que dans

³⁷ Plus précisément, dans *La Construction logique du monde*, Carnap (1928) esquisse un système d'objets et de concepts qui comporte trois ordres de niveaux. Les « niveaux inférieurs » (« *die unteren Stufen* ») concernent les « objets du psychisme propre » (« *eigenpsychische Gegenstände* ») et comportent des concepts tels que « les vécus élémentaires [*Elementarerlebnisse*]', la ressemblance partielle [*Teilähnlichkeit*]', les cercles de ressemblance, les classes de qualité [*Qualitätsklassen*]', l'identité partielle, la ressemblance entre qualités, les classes sensibles [*Sinnesklassen*]', le sens de la vue [*der Gesichtssinn*]', les sensations [*die Empfindungen*]', la décomposition des vécus en constituants individuels et généraux, les positions du champ visuel et leur ordre dans le champ visuel, les couleurs et leur ordre dans le corps des couleurs, l'ordre temporel provisoire [*di vorläufige Zeitordnung*'] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 310). Les « niveaux intermédiaires » (« *die mittleren Stufen* ») concernent, en revanche, les « objets physiques » (« *physische Gegenstände* ») et impliquent la constitution de « l'espace tridimensionnel... à partir de l'ordre bidimensionnel du champ visuel » (« *der dreidimensionale Raum... aus der zweidimensionalen Ordnung des Sehfeldes* »), celle du « monde visuel' (à quatre dimensions) par attribution des couleurs aux 'points de monde' » (« *die (vierdimensionale) 'Sehwelt' durch Zuschreibung von Farben zu den 'Weltpunkten'* »), celle des « choses visuelles » (« *Sehdinge* ») comme « parties définies de ce monde » (« *bestimmte Teile dieser Sehwelt* »), et notamment du corps de l'observateur comme chose de ce même monde, celle du « monde de la perception » (« *Wahrnehmungswelt* ») « par attribution des qualités des autres sens » (« *durch Zuschreibung der Qualitäten der übrigen Sinne* ») au « monde visuel » et, en conclusion, celle du « monde de la physique » (« *physikalische Welt* ») en remplaçant l'attribution de qualités aux points de monde par l'attribution de « grandeurs d'état physiques » (« *die Werte der physikalischen Zustandsgrößen* ») (Carnap 1928, p. 310-311). Les « degrés supérieurs » (« *die oberen Stufen* ») concernent, en conclusion, « le psychisme d'autrui et les objets spirituels » (« *fremdpsychische und geistige Gegenstände* »), c'est-à-dire la constitution du « monde vécu » (« *Lebenswelt* ») d'autres êtres humains tel que peut se le représenter un observateur donné, par l'intermédiaire de comportements visibles comme la « donation de signes » (« *Zeichengebung* ») et les « manifestations linguistiques » (« *Sprachäußerungen* »), ainsi que la constitution du « monde intersubjectif » (« *intersubjektive Welt* ») et des « objets sociologiques » (« *die soziologischen Gebilde* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 311-312).

l'application de méthodes et de concepts dont se servent également les secondes, et notamment de la « *théorie des relations* » (« *Relationstheorie* ») – qui permet de traiter d'emblée presque tous les problèmes de la théorie pure de l'ordre [*'alle Probleme der reinen Ordnungslehre'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 59) et qui est issue de la « *logistique* » (« *Logistik* ») d'Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1910, 1912, 1923) –, à un plus haut niveau d'abstraction. Nous pouvons donc en conclure que les tenants de l'empirisme logique considéraient la reconstruction rationnelle du savoir comme constituant non seulement la tâche de la philosophie, toujours en tant que théorie de la connaissance, mais également celle des sciences – et plus précisément de ce que Carnap (1928) appelait les « *sciences du réel* » (« *Realwissenschaften* »), à savoir les sciences de la nature, la psychologie et les sciences humaines, pour les distinguer des sciences formelles et analytiques que sont la logique et les mathématiques –, à la seule différence près que la première ne viserait pas à reconstruire l'ensemble du savoir sous la forme d'un système ordonné de concepts. En effet, c'est précisément en cela que consisterait, d'après Carnap (1928), la tâche des sciences, dans la mesure où, « en intégrant les objets de la [connaissance scientifique] au sein d'un seul système global de constitution [*'das eine konstitutionale Gesamtsystem'*], les diverses 'sciences' [*'die verschiedenen 'Wissenschaften'*], organisées en système, apparaissent alors comme les branches de la science unifiée [*'als Zweige der einen Gesamtwissenschaft'*] ». La philosophie se limiterait, en revanche, « aux études logiques requises pour ce faire » (« *die logischen Untersuchungen hierfür* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 291), et se résumerait ainsi, en tant que théorie de la connaissance, à une « *théorie de la constitution* » (« *Konstitutionstheorie* ») du système des concepts et des objets de la science unifiée (Carnap 1928 ; 2002, p. 198). Plus précisément, en suivant la suggestion de Norma Yunez-Naude (2001), nous pouvons identifier deux aspects dans la manière dont Carnap (1928) présente, dans *La Construction logique du monde*, la nature et l'œuvre propre d'une telle théorie de la constitution, notamment en ce qui concerne son rapport aux mathématiques. D'une part, nous pouvons identifier, en effet, un aspect philosophique

qui recouvre diverses thèses épistémologiques, notamment (i) la thèse portant sur la science unifiée qui concerne l'idée de la constitution unitaire du savoir empirique ; (ii) la thèse structuraliste, selon laquelle les contenus empiriques de la connaissance ne sont que subjectifs ; sa structure, en revanche, est la base d'une connaissance authentique ; (iii) la thèse logico-formelle selon laquelle la forme logique 'est l'ordre le plus élevé de la formalisation et de la dématérialisation' [*'die höchste Stufe der Formalisierung und Entmaterialisierung'*] (§12) (Yunez-Naude 2001, p. 59).

D'autre part, nous pouvons également distinguer un « aspect technique de la constitution qui concerne la mise en œuvre de la constitution par des moyens purement logiques et mathématiques » (Yunez-Naude 2001, p. 59). Il s'ensuit que, afin de répondre à la question que nous avons soulevée en conclusion de la section précédente, nous devons analyser en quoi la manière dont les tenants de l'empirisme logique, et surtout Rudolf Carnap (1928, 1931, 1932b, 1934, 1936a, 1936b, 1937, 1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000), envisageaient la nature de la philosophie, en tant que théorie formelle de la connaissance (notamment de la connaissance empirique) – et donc en tant que théorie de la constitution –, à l'aune des deux dogmes de l'empirisme dont parlait Quine (1951, 1953) a pu influencer leur vision de la nature de la connaissance scientifique en tant que système unitaire de concepts et d'objets logiquement constitués.

Pour ce faire, il est nécessaire de s'interroger sur la manière dont la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, en tant que constitution d'un tel système de concepts et d'objets, a évolué au fur et à mesure que Carnap (1934) a fini par développer, tout au long des années 1930, une vision de la théorie de la connaissance comme analyse de la « syntaxe logique du langage » (« *logische Syntax der Sprache* ») dans lequel s'exprime ce même savoir. Comme le remarque Michael Friedman (2009), en effet, c'est précisément après que Carnap (1934) avait déplacé son centre d'intérêt de la question des conditions de possibilité de la constitution d'un système unifié des concepts scientifiques vers celle de l'analyse de la syntaxe logique du langage des sciences, en y consacrant un ouvrage paru en 1934 sous le titre de « *Die logische Syntax der Sprache* » (Carnap 1934), que le dogme de l'analyticité – et notamment le dogme de l'analyticité des vérités logico-mathématiques –, ainsi que le dogme du réductionnisme ont fini par devenir « des piliers corrélés et complémentaires de sa position philosophique plus générale » (« *correlative and complementary pillars of his overall philosophical position* ») (Friedman 2009, p. 241). Comme nous le verrons par la suite, une telle observation semble contredire l'interprétation de la manière dont Carnap concevait la reconstruction rationnelle du savoir qu'a fournie Quine (1951, 1953) lui-même. Dans son analyse des relations logiques qui existent entre le dogme du réductionnisme et la théorie vérificationniste de la signification, ce dernier a établi, en effet, un lien de filiation directe entre le projet de reconstruction rationnelle du savoir scientifique auquel s'était attelé Carnap (1928) dans *La Construction logique du monde* (*Der logische Aufbau der Welt*), d'une part, et la thèse fondamentale de l'empirisme classique, dont Quine (1951, 1953) faisait remonter l'origine à John Locke (1690) et à David Hume (1748), d'autre part. Mais en quoi consiste, plus précisément, cette thèse fondamentale ? En suivant Karl Popper (1979), nous pouvons la résumer de la manière suivante : « *p* est vérifié ou démontré par l'expérience sensible [*'verified or demonstrated by sense experience'*] = il y a pour nous une raison suffisante ou une justification [*'a sufficient reason or justification'*] de croire *p* = nous croyons, ou

jugeons, ou affirmons, ou sommes d'accord, ou savons, que p est vrai = p est vrai = p » (Popper 1979 ; 1998, p. 209), « de sorte que toute connaissance consiste en une information reçue par l'intermédiaire de nos sens [*information received through our senses*'] ; autrement dit, par l'expérience [*by experience*'] » (Popper 1979 ; 1998, p. 121). Cette thèse repose, en outre, sur le présupposé que l'on pourrait « isoler [*single out*'] les données, ou éléments, ou '*sense data*', ou impressions des sens, ou expériences immédiates, pour en faire le fondement assuré de toute connaissance [*a secure basis for all knowledge*'] » (Popper 1979 ; 1998, p. 123). Par conséquent, c'est précisément dans un tel sens, c'est-à-dire comme étant une tentative de justifier la réduction à quelques données élémentaires de l'expérience sensible de tout contenu de connaissance que l'on peut formuler au moyen d'énoncés de la forme p – d'un point de vue épistémologique – , ainsi que de tout objet empirique dont nous pouvons prendre conscience au travers de nos organes de perception – d'un point de vue ontologique – que Quine (1951, 1953) a interprété ce qu'entend Carnap (1928), dans *La Construction logique du monde*, par « reconstruction rationnelle du savoir », et donc également, comme nous venons de le voir, la manière dont ce dernier envisageait aussi bien le but de la philosophie que celui des sciences. Cela dit, en quoi consiste, plus précisément, cette interprétation ontologico-épistémologique de la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir que semble suggérer Quine (1951, 1953) ? En quoi le fait de relire *La Construction logique du monde* à l'aune de *Die logische Syntax der Sprache* nous permettrait-il, en revanche, de remettre en cause une telle interprétation de la manière dont Carnap (1928, 1934) envisageait aussi bien le savoir scientifique, en tant que corps de connaissances, que la théorie de la connaissance ? Afin de répondre à ces questions, nous verrons, dans un premier moment (section 1.2.1), en quoi la manière dont, dans *La Construction logique du monde*, Carnap (1928) mobilise des thèses que l'on pourrait assimiler au dogme de l'analyticité et au dogme du réductionnisme, dans le but de développer une reconstruction rationnelle de notre connaissance de la réalité, se prête effectivement à une lecture ontologico-épistémologique d'un tel projet, conçu comme une tentative d'appliquer la thèse fondamentale de l'empirisme classique à des objets et à des concepts de plus en plus complexes, par l'intermédiaire des principes et des théorèmes de la logique mathématique, conçus, précisément, comme étant des vérités analytiques. Dans un second moment (section 1.2.2), nous verrons, néanmoins, en quoi une relecture de *La Construction logique du monde*, menée au prisme de *Die logische Syntax der Sprache*, nous permet d'identifier dans ce premier ouvrage les prémices d'une conception de la reconstruction rationnelle du savoir comme réduction de toute question scientifique à une question logique, c'est-à-dire d'une conception que l'on pourrait qualifier de « logico-analytique » et qui relèverait d'une approche de la philosophie, en tant que théorie de la connaissance, comme analyse de la syntaxe logique du langage des sciences. Nous verrons, en outre, en quoi une telle conception de la

reconstruction rationnelle du savoir était étroitement liée au projet de construire un langage universel des sciences, modelé sur une reconstruction purement syntaxique du langage de la physique.

1.2.1 Rudolf Carnap et les deux dogmes de l'empirisme : une approche ontologico-épistémologique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique ?

Dans *La Construction logique du monde*, Carnap (1928) affirme, en guise de thèse préliminaire à la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, que tout « énoncé scientifique » (« *wissenschaftliche Aussage* ») – et donc, plus généralement, tout énoncé synthétique – peut être transformé, par principe, en une « proposition de structure » (« *Strukturaussage* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 68). Telle que la définit Carnap (1928), une proposition de structure n'est, en effet, rien d'autre qu'un énoncé dont le contenu se réduit à une caractérisation (« *Kennzeichnung* »)³⁸ d'un ou de plusieurs domaines d'objets en termes de propriétés de structure – c'est-à-dire en termes de « relations » (« *Beziehungen* ») qu'il est possible de décrire, tout simplement, au moyen de leurs « propriétés formelles » (« *formale Eigenschaften* ») entre les objets du domaine, ou des domaines, en question³⁹ –, ainsi qu'à l'« énonciation » (« *Angabe* ») de ces mêmes domaines (Carnap 1928 ; 2002, p. 69), c'est-à-dire à leur désignation explicite. Il en découle que, sur la base d'un tel présupposé, il serait toujours possible, du moins en principe, de traduire un énoncé qui relève des sciences empiriques en un énoncé qui porte sur des objets et sur des relations purement formelles entre ces derniers, si bien qu'on pourrait toujours le « réduire » (« *zurückführen* ») à un énoncé portant sur des objets plus simples et sur des relations plus fondamentales, c'est-à-dire, potentiellement, à un énoncé qui porte directement sur quelques données élémentaires de l'expérience. En conséquence, c'est précisément en cela que consisterait, aux yeux de Carnap (1928) lui-même, la caractéristique

³⁸ « Un énoncé scientifique [*wissenschaftliche Aussage*] n'a de sens [*Sinn*] que si l'on peut indiquer la signification des noms d'objet qu'il comporte [*die Bedeutung der vorkommenden Gegenstandsnamen*]. Pour ce faire, il existe deux possibilités différentes : la première est la 'monstration' (*Aufweisung*). L'objet en question est rendu accessible à la perception [*wahrnehmbar gemacht*] et désigné par un geste [*hinweisende Gebärde*]; par exemple, « voilà le Feldberg ». La seconde consiste en une périphrase dépourvue d'ambiguïté [*eindeutige Umschreibung*] que nous nommons caractérisation (*Kennzeichnung*). Une caractérisation n'indique pas toutes les propriétés de l'objet [*Eigenschaften des Gegenstandes*], sinon elle remplacerait la perception réelle [*konkrete Wahrnehmung*], mais elle s'appuie sur l'observation [*Anschauung*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 71-72).

³⁹ Plus précisément, Carnap (1928) définit ici « la 'structure' [*Struktur*] ou 'nombre relationnel' [*Relationszahl*] d'une relation P ...comme la classe des relations isomorphes à P [*die Klasse der zu P isomorphen Relationen*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 101), c'est-à-dire la classe de toutes les relations Q telles que, pour tous les couples d'objets (a, b) et (c, d) d'un même ou de deux domaines différents, $aPb \equiv cQd$.

qui permet de départager les énoncés des sciences empiriques, ou sciences du réel, et ceux qui relèvent de la logique ou des mathématiques, en ceci que ces derniers ne porteraient, justement, pas sur des « objets réels » (« *eigentliche Gegenstände* ») : la « logique » (« *Logik* »), précise, en effet, Carnap (1928),

(incluant la mathématique) [*‘(einschl. der Mathematik)’*] n’est composée que de stipulations conventionnelles relatives à l’usage des symboles [*‘konventionelle Festsetzungen über den Gebrauch von Zeichen’*] et de tautologies [*‘Tautologien’*] basées sur ces conventions. Par suite, les symboles logiques et mathématiques [*‘die Zeichen der Logik und der Mathematik’*] ne désignent pas [*‘bezeichnen daher nicht’*] des objets mais servent seulement à symboliser ces conventions (Carnap 1928 ; 2002, p. 200).

Dans une telle perspective, qui se situe – comme le rappelle Pierre Wagner (2001) – dans la droite ligne des thèses que défendait Ludwig Wittgenstein (1922)⁴⁰ à ce même sujet, la signification des énoncés qui relèvent de la logique et des mathématiques dépend uniquement de leur forme logique et des définitions conventionnelles que l’on peut donner des termes qui y figurent. Tout en étant dépourvus d’un objet qui leur soit propre, les énoncés logiques et mathématiques jouent, néanmoins, un rôle fondamental dans la « reconstruction rationnelle » (« *rationale Nachkonstruktion* ») de notre connaissance du monde réel par le biais de « concepts » (« *Begriffe* ») et de relations entre concepts, ou, de manière équivalente, par le biais d’« objets » (« *Gegenstände* ») et de relations entre objets – puisque, aux yeux de Carnap (1928), la distinction entre ces deux types d’entités n’était pas autre chose qu’une question de perspective, dans la mesure où « à chaque concept correspond un objet et un seul, ‘son objet’ » (« *gehört zu jedem Begriff ein und nur ein Gegenstand, ‘sein Gegenstand’* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 61)⁴¹ –, telle que l’envisageait Carnap (1928), en ceci qu’ils permettent de

⁴⁰ « 6.113 – La marque particulière des propositions logiques est que l’on peut reconnaître sur le seul symbole qu’elles sont vraies [*‘true from the symbol alone’*], et ce fait clôt sur elle-même toute la philosophie de la logique. Et c’est même un des faits les plus importants que la vérité ou la fausseté des propositions non logiques *ne* se laisse *pas* reconnaître sur la seule proposition [*‘the truth or falsity of non-logical propositions cannot be recognized from the propositions alone’*] » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 96-97).

⁴¹ « Contrairement à la doctrine traditionnelle du concept [*‘im Gegensatz zur bisherigen Begriffslehre’*], la généralité d’un concept nous semble relative [*‘relativ’*] et par suite, la limite entre concepts généraux et individuels [*‘die Grenze zwischen Allgemeinbegriffen und Individualbegriffen’*] varie suivant le point de vue [*‘je nach dem Gesichtspunkt’*]...Qu’un symbole déterminé [*‘Gegenstandszeichen’*] corresponde au concept ou à l’objet, qu’une proposition vaille pour des concepts ou des objets, cela ne traduit aucune différence d’ordre logique [*‘kein logischer Unterschied’*], mais tout au plus d’ordre psychologique relative à la représentation subjective [*‘ein Unterschied der repräsentierenden Vorstellungen’*].

formuler et de transformer les énoncés qui relèvent des sciences empiriques et qui portent, ainsi, sur ce même monde. Autrement dit, Carnap (1928) considèrerait que, bien que leurs concepts et leurs objets n'appartiennent pas au système conceptuel auquel doit aboutir la reconstruction rationnelle du savoir, la logique et les mathématiques nous apportent, néanmoins, les moyens nécessaires à l'édification d'un tel système, si bien que, comme l'explique Pierre Wagner (2001)⁴², il regardait la reconstruction rationnelle des mathématiques, par leur réduction à la logique, moins comme étant l'une des tâches de la reconstruction rationnelle du savoir, que comme étant l'une de ses prémisses. C'est pour cette même raison qu'il concevait le programme de *La Construction logique du monde* comme étant une extension aux sciences empiriques du programme de fondation des mathématiques qu'avaient développé Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), dans leurs *Principia Mathematica*.

En conséquence, d'une part, la reconstruction rationnelle du savoir scientifique s'opèrerait, toujours aux yeux de Carnap (1928), par l'intermédiaire de symboles et de relations qui sont de nature logique et mathématique, en ceci qu'elle se traduirait par l'édification d'un système hiérarchique de « définitions constitutives » (« *konstitutionale Definition* »)⁴³ de concepts ou d'objets, d'où l'on

Au fond, il ne s'agit pas du tout de deux conceptions différentes [*'zwei verschiedene Auffassungen'*] mais seulement de deux manières différentes de formuler l'interprétation [*'zwei verschiedene Sprechweisen der Interpretation'*]. C'est pourquoi dans la théorie de la constitution, nous parlons tantôt des objets tantôt des concepts constitués sans faire de différence essentielle » (Carnap 1928 ; 2002, p. 61).

⁴² Alors que Bertrand Russell (1903) considèrerait qu'il fallait distinguer deux problèmes, « qui correspondent respectivement aux tâches de la logique *mathématique* et de la logique *philosophique*, à savoir la réduction des concepts et des vérités mathématiques à des concepts et à des vérités logiques fondamentaux, d'une part, ainsi que la résolution des « questions épistémologiques qui portent sur les éléments de la logique elle-même », d'autre part, « pour Carnap [(1928)], même si le programme logiciste n'est pas achevé, l'existence des *Principia Mathematica*, qui lui servent de paradigme, donne une bonne raison de penser que la base logique du système [de constitution] est suffisamment bien établie pour qu'il soit inutile de s'attarder sur la première étape de la construction, celle des mathématiques » (Wagner 2001, p. 32-33).

⁴³ « 'Constituer' un concept à partir d'autres concepts [*'einen Begriff aus anderen Begriffen konstituieren'*] signifie donner sa définition constitutive sur la base de ces autres concepts. Nous entendons par définition constitutive du concept *a* sur la base des concepts *b, c* [*'konstitutionale Definition des Begriffes a auf Grund der Begriffe b, c'*] une règle de traduction [*'eine Übersetzungsregel'*] qui indique de manière générale comment toute fonction propositionnelle [*'eine Aussagefunktion'*] dans laquelle apparaît *a* peut être transformée en une fonction propositionnelle de même extension [*'eine umfangsgleiche Aussagefunktion'*] dans laquelle on ne rencontre plus *a* mais seulement *b* et *c*. Dans le cas le plus simple, cette règle de traduction est une méthode de remplacement [*'Anweisung'*] de *a*, chaque fois qu'il apparaît, par une expression déterminée dans laquelle n'apparaissent que *b* et *c* (définition explicite) [*'explizite Definition'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 102). Par « fonction propositionnelle », Carnap (1928) entend ici l'expression qui est désignée par le « signe insaturé » (« *ungesättigtes Zeichen* ») – c'est-à-dire dénué de signification indépendante – que nous obtenons si « dans une phrase nous supprimons un ou plusieurs noms d'objets [*'mehrere Gegenstandsnamen'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 92).

pourrait déduire des énoncés qui portent sur les propriétés de ces mêmes concepts et de ces mêmes objets, c'est-à-dire des énoncés que l'on peut appeler « théorèmes 'analytiques' » (« *'analytische' Lehrsätze* »), par opposition aux énoncés « qui indiquent une relation entre objets constitués, établie seulement au moyen de l'expérience [*'eine nur durch Erfahrung festzustellende Beziehung'*] », que l'on appelle, en revanche, « théorèmes 'empiriques' » (« *'empirische' Lehrsätze* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 197-198). Carnap (1928) qualifiait un tel système de « système de constitution » (« *Konstitutionssystem* ») et il tenait également à préciser que, contrairement à « d'autres systèmes de concepts » (« *andere Begriffssysteme* »), un tel système de constitution ne viserait pas seulement « à classer les concepts en diverses catégories (*Arten*) et à examiner les différences et les relations mutuelles de ces catégories [*'die Unterschiede und gegenseitigen Beziehungen dieser Arten zu untersuchen'*] », mais également à « constituer » (« *konstituieren* »), justement, ces derniers, c'est-à-dire à les dériver « par degré de certains concepts fondamentaux [*'aus gewissen Grundbegriffen stufenweise'*], afin de dresser un arbre généalogique des concepts [*'ein Stammbaum der Begriffe'*] au sein duquel chacun trouve sa place déterminée [*'seinen bestimmten Platz findet'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 57). C'est pourquoi, d'autre part, le fondement ultime – la « base » (« *Basis* ») – d'un tel système ne serait rien d'autre que la conjonction d'un ensemble d'« éléments fondamentaux » (« *Grundelemente* ») et d'un ensemble de « relations fondamentales » (« *Grundrelationen* ») qui sont, en revanche, de nature empirique. Plus précisément, il s'agirait de l'ensemble d'éléments que constitue le domaine des « objets psychiques [*'psychische Gegenstände'*] qui n'appartiennent qu'à un seul sujet » (Carnap 1928 ; 2002, p. 137-138) et de l'ensemble des relations, de la forme « *x Rap y* », qui consistent en ceci que l'objet psychique *x* nous rappelle l'objet *y* puisqu'il lui ressemble, et que l'on peut appeler, pour cette même raison, relations de « rappel de ressemblance » (« *Ähnlichkeitserinnerung* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 162). En conséquence, c'est justement la conjonction de ces deux ensembles que Carnap (1928) qualifiait de « base autopsychique » (« *eigenpsychische Basis* ») ou « solipsiste » (« *solipsistisch* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 137-138) du système de constitution, et qui représentait, à ses yeux, le fondement, non pas formel-structurel, mais perceptif-intuitif, auquel il serait possible de réduire, en dernière instance, toutes les relations, de même que tous les objets, ou tous les concepts, que l'on construit dans le cadre du système de constitution lui-même. Bien qu'il démontre qu'il serait également possible d'édifier un système de constitution de notre connaissance du monde reposant sur une base qui se compose d'éléments et de relations physiques⁴⁴, Carnap (1928) finit tout de même par choisir, dans *La Construction logique du*

⁴⁴ Carnap (1928) montre, par exemple, en quoi l'on peut prendre pour éléments fondamentaux les points de l'espace-temps du *continuum* spatio-temporel à quatre dimensions [*'die Raum-Zeit-Punkte des vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuums'*] et pour relations fondamentales leurs rapports de position dans ce *continuum* [*'ihre Lagebeziehungen im*

monde, une base psychique, notamment une base auto-psychique, et cela en raison d'un principe de « primauté cognitive » (« *erkenntnismäßige Primarität* »). D'après un tel principe, en effet,

un objet (et une catégorie d'objets) [*'Gegenstandsart'*] est dit *premier dans l'ordre de la connaissance* [*'erkenntnismäßig primär'*] par rapport à un objet qui sera dit *second* [*'erkenntnismäßig sekundär'*] quand celui-ci est connu par l'intermédiaire de celui-là [*'der andere durch die Vermittlung des ersten erkannt wird'*] et quand par suite la connaissance du premier est supposée pour celle du second [*'(der andere) zu seiner Erkennung die Erkennung des ersten voraussetzt'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 127).

Cela implique, justement, que les objets auto-psychiques sont premiers par rapport aux objets physiques, du moins du point de vue de la théorie de la connaissance⁴⁵, en ceci que les seconds sont connus par l'intermédiaire des premiers, et non pas l'inverse (Carnap 1928 ; 2002, p. 138-140). Il en découle que la reconstruction rationnelle du savoir, telle que la présente Carnap (1928) dans *La Construction logique du monde*, s'articule en deux tâches distinctes : d'une part, la construction logique d'objets et de propriétés de structures à partir des objets et des relations fondamentales dont se compose la base du système de constitution – que Carnap (1928) considérait comme étant, justement « la première tâche de la science » (« *die erste Aufgabe der Wissenschaft* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 292) – dans le but d'« esquisser un modèle [logico-mathématique]⁴⁶ du monde phénoménique des sensations, qui permettrait, à son tour de construire un *pont* menant des

Kontinuum'] et les rapports co-univoques entre nombres réels et points de l'espace-temps [*'die einmehrdedeutigen Zuordnungen zwischen reellen Zahlen und Raum-Zeit-Punkten'*] qui correspondent aux composantes individuelles des fonctions de potentiel : du champ électromagnétique quadri-vectoriel et du champ tensoriel de gravitation » (Carnap 1928 ; 2002, p. 136).

⁴⁵ « Comme la tâche des sciences du réel [*'die Aufgabe der Realwissenschaften'*]... consiste d'une part à découvrir des lois générales [*'Aufindung genereller Gesetze'*], d'autre part à expliquer les processus particuliers [*'Erklärung individueller Vorgänge'*] par leur subsomption sous des lois générales, le système de constitution à base physique [*'mit Basis im Physischen'*] présente la classification des concepts la plus appropriée au point de vue de ces sciences [*'die für den Gesichtspunkt der Realwissenschaft geeignetste Ordnung der Begriffe'*]...Du point de vue de la théorie de la connaissance [*'Vom erkenntnistheoretischen Gesichtspunkt aus'*] [c'est-à-dire du point de vue de l'élucidation des fondements logiques et cognitifs du système de constitution de la connaissance scientifique] (contrairement à celui des sciences du réel), nous sommes conduits à un autre ordre des concepts, au système de constitution ayant le psychisme propre pour base [*'Konstitutionssystem mit eigenpsychischer Basis'*] » (Carnap 1928, 2002, p. 134).

⁴⁶ En cela, Carnap (1928) suivait, encore une fois, Wittgenstein (1922). Dans le *Tractatus logico-philosophicus*, ce dernier écrit que « la proposition est un modèle de la réalité, telle que nous nous la figurons » (« *A proposition is a model of reality as we imagine it.* ») (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 51).

phénomènes sensoriels au monde des objets physiques macroscopiques localisés dans l'espace et dans le temps », comme a pu l'expliquer Ulises Moulines (2001, p. 45) ; d'autre part, justement, l'étude de la base d'un tel système de constitution, en tant qu'étude de ces « propriétés et relations non constitutionnelles [c'est-à-dire qui ne résultent pas de la construction du système de constitution lui-même] des objets » (« *nicht konstitutionale Eigenschaften und Beziehungen der Gegenstände* ») qui permettent de « vérifier » (« *verifizieren* ») les différentes « formules de constitution des objets » (« *Konstitutionsformeln der Gegenstände* »), c'est-à-dire de les « contrôler » (« *nachprüfen* ») empiriquement (Carnap 1928 ; 2002, p. 292).

Ces deux tâches se distinguent, ainsi, l'une de l'autre non seulement par leurs objectifs, mais également par les méthodes qui permettent de les accomplir. La première « est résolue par une stipulation [*'durch eine Festsetzung'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 292), c'est-à-dire par une construction logique et mathématique qui se fait au moyen de symboles et de relations de nature purement formelle et qui emprunte « des procédures de construction typiques de la théorie des ensembles » : « on passe de l'étage n à l'étage $n + 1$ en constituant des ensembles ou sous-ensembles des entités de n ou en établissant des relations entre ces entités, c'est-à-dire en considérant l'ensemble-puissance⁴⁷ ou des produits cartésiens⁴⁸ des ensembles donnés » (Moulines 2001, p. 45). La seconde est résolue, en revanche, « par l'expérience » (« *durch Erfahrung* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 292), si bien que, écrit ainsi Carnap (1928), tout comme le botaniste lorsqu'il s'attelle à « la reconstruction de l'identification de la plante » (« *die Nachkonstruktion der Erkennung der Pflanze* »), le scientifique qui s'emploie à une reconstruction rationnelle du savoir, ou de l'un de ses pans, doit apporter une réponse à deux questions différentes :

qu'est-ce qui a été véritablement vu dans le vécu de reconnaissance [*'in der erlebten Wiedererkennung'*] [c'est-à-dire dans la connaissance purement intuitive] et qu'est-ce qui relève de son traitement aperceptif [*'die apperzeptive Verarbeitung'*] [c'est-à-dire de la synthèse cognitive des différentes combinaisons et configurations dans lesquelles se présente le donné qui s'opère sur la base du vécu de la conscience lui-même] ? Mais il ne peut séparer ces deux composantes réunies dans le résultat que par abstraction [*'durch Abstraktion'*]. C'est ainsi par abstraction que la théorie de la constitution [*'Konstitutionstheorie'*] [et donc la philosophie comme théorie de

⁴⁷ On appelle « l'ensemble-puissance de l'ensemble X » (« *the power set of X* »), $P(X)$, « l'ensemble de tous les sous-ensembles de X » (« *the set of all subsets of X* »), c'est-à-dire $P(X) = \{u : u \subset X\}$ (Jech 2006, p. 9).

⁴⁸ Plus précisément, le produit cartésien de deux ensembles X et Y , qui se désigne par $(X \times Y)$, est l'ensemble des objets $\{z | (\exists x)(\exists y)(z = (x, y) \text{ et } x \in X \text{ et } y \in Y)\}$ (Bourbaki 1970, E. II.8).

la connaissance] doit séparer, dans la reconstruction rationnelle, le donné pur et ce qui est traité [*die Trennung zwischen dem reinen Gegebenen und der Verarbeitung*], non pas pour tel cas particulier mais pour l'ensemble du courant de conscience [*für den gesamten Bewußtseinsverlauf*] (Carnap 1928 ; 2002, p. 189).

Autrement dit, en accord avec la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne telle qu'elle serait énoncée l'année suivante à l'occasion de la publication du manifeste éponyme (Carnap *et al.* 1929), le programme de reconstruction rationnelle du savoir que Carnap (1928) esquissait en 1928 se fondait sur l'identification de deux « composantes de la connaissance » (« *Komponenten der Erkenntnis* »), « conventionnelle et empirique » (« *die konventionelle und die empirische* ») – qui correspondent, respectivement, à la synthèse cognitive des représentations et au donné pur de la conscience – ainsi que sur la réfutation de la thèse qu'il en existerait également une troisième, de nature « synthétique *a priori* » (« *a priori-synthetische* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 292). Ce sont précisément ces deux opérations que Carnap (1928) considérait, à l'époque, comme constituant la tâche fondamentale de la philosophie en tant que théorie de la connaissance, et donc comme théorie de la constitution d'un système conceptuel unifié de la science en tant que corps de connaissances. Il semblerait, en conséquence, que la synthèse entre empirisme et conventionnalisme que propose Carnap (1928) dans *La Construction logique du monde* consiste à se servir des outils conceptuels de la logique moderne pour montrer en quoi il serait possible de dégager un système d'énoncés, sous la forme de propositions de structure, qui permettent d'étendre et de développer la véritable base objective, c'est-à-dire non exclusivement logique, de toute connaissance empirique.

Comme nous l'avons remarqué plus haut, Carnap (1928) identifiait cette base objective de la connaissance empirique avec les « *vécus eux-mêmes dans leur totalité et leur unité achevée* » (« *Erlebnisse* »), c'est-à-dire avec les « *vécus du moi en tant qu'unités* », d'où il est possible d'abstraire, dans un second moment, les différents éléments qui les constituent, tels que, par exemple, les « *sensations* » (« *Empfindungen* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 144). De plus, l'expansion de cette base autopsychique du savoir que comporte la construction d'un système de constitution des concepts et des objets des sciences coïncide également avec la réduction de ces mêmes concepts et de ces mêmes objets aux composantes de cette dernière, d'après la définition même du concept de « *réductibilité* » (« *Zurückführbarkeit* ») que fournissait Carnap (1928) : « *un objet est réductible à d'autres objets quand toutes propositions portant sur lui peuvent être traduites en propositions qui ne portent plus que sur ces autres objets* » (« *wenn alle Sätze über ihn übersetzt werden können in Sätze, die nur noch von den anderen Gegenständen sprechen* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 102). En d'autres termes, d'après une telle définition, traduire un énoncé scientifique en un énoncé qui porte sur des *vécus du moi* revient à réduire l'objet, ou les objets, du premier à ceux du second. C'est ainsi

que, à la lumière de telles considérations, il semblerait tout à fait naturel d'en conclure que, dans la perspective de la reconstruction rationnelle du savoir telle que la présentait Carnap (1928) en 1928, chaque énoncé synthétique doué de signification, c'est-à-dire chaque énoncé empiriquement « vérifiable » (« *verifizierbar* »), « équivaut à une construction logique [*'logical construct'*] à partir de termes qui renvoient à l'expérience immédiate [*'immediate experience'*] », ce qui correspond précisément au contenu du dogme du réductionnisme tel que le présentait Quine (1951, 1953). Toujours en suivant la manière dont Quine (1951, 1953) décrivait un tel dogme, nous pouvons donc également en conclure que, dans *La Construction logique du monde*, Carnap (1928) se servirait du dogme de l'analyticité – et notamment de l'analyticité des vérités logico-mathématiques – comme d'un simple outil pour appliquer la thèse fondamentale de l'empirisme classique, et donc le principe du réductionnisme, à des objets et à des concepts de plus en plus complexes. Par conséquent, c'est précisément à une telle conclusion que se résume l'interprétation ontologico-épistémologique que l'on peut donner du projet carnapien de reconstruction rationnelle du savoir scientifique, ainsi que de sa conception de la philosophie comme théorie de la connaissance qui se traduirait par une théorie de la constitution du système unitaire des concepts et des objets scientifiques, si l'on s'inspire de l'analyse des deux dogmes de l'empirisme qu'a effectuée Quine (1951, 1953) lui-même. Cela dit, en quoi l'analyse du langage des sciences que mène Carnap (1934) dans *Die logische Syntax der Sprache* contiendrait-elle, du moins en germe, une interprétation alternative du projet de reconstruction rationnelle du savoir que Carnap (1928) avait lui-même esquissé dans *La Construction logique du monde* ?

1.2.2 La reconstruction rationnelle du savoir au prisme de *Die logische Syntax der Sprache* : la philosophie comme logique de la science et la science comme système d'énoncés

Afin de répondre à cette autre question, il est avant tout nécessaire de clarifier ce qu'entendait Carnap (1934, 1942) par « analyse de la syntaxe logique » d'un certain langage formel. Pour ce faire, nous pouvons nous pencher sur un ouvrage publié en 1942 et intitulé « *Introduction to Semantics* », dans lequel Carnap (1942) reprend à son compte, dans le but de l'appliquer à l'étude des langages formels, la tripartition de la sémiotique (« *semiotics* ») – c'est-à-dire de la science générale des signes linguistiques – en pragmatique (« *pragmatics* »), sémantique (« *semantics* ») et, justement, syntaxe (« *syntax* ») qu'avait développée le linguiste Charles W. Morris (1938). Dans ce même ouvrage, Carnap (1942) écrit, en effet, que, si l'on étudie les expressions d'un certain langage formel par rapport au locuteur (peu importe ce que désignent de telles expressions), alors on se situe du point de vue de la pragmatique, que l'on peut définir, en conséquence, comme étant le domaine de l'analyse

des langages formels qui s'intéresse aux « processus qui ont lieu dans les organes du langage [*'speaking language'*] et dans le système nerveux par rapport aux activités linguistiques [*'speaking activities'*] », aux relations qui existent entre « le comportement linguistique » (« *speaking behavior* ») et d'autres types de comportements, ou encore aux bases ethnologiques et sociologiques des « habitudes linguistiques » (« *speaking habits* ») (Carnap 1942, p. 10). Si, au contraire, l'on fait abstraction du locuteur et l'on analyse seulement les expressions du langage formel en question et ce qu'elles désignent, l'on se situe dans le domaine de la sémantique. Plus précisément, en adoptant la « conception sémantique de la vérité » (« *semantic conception of truth* ») (Tarski 1944) que le logicien polonais Alfred Tarski (1935a) avait commencé à développer dans son article pionnier sur « le concept de vérité dans les langages formalisés » (« *the concept of truth in formalized languages* »), Carnap (1942) maintient ici que la sémantique, en tant qu'analyse de ce qu'on appelle « la signification d'expressions » (« *the meaning of expressions* »), consiste à traduire les termes et les expressions d'un langage donné dans un langage d'ordre supérieur – c'est-à-dire dans un langage associé à un plus ample vocabulaire et à un plus ample ensemble de règles permettant de manipuler les énoncés que l'on peut formuler sur la base de ce même vocabulaire –, communément appelé « métalangage » (« *metalanguage* »), qui contient deux types de signes et deux types de règles différents : premièrement, la totalité des signes et des règles syntaxiques du langage de départ, qui devient ainsi ce qu'on appelle le « langage objet » (« *object language* ») du métalangage en question ; deuxièmement, des signes et des règles spécifiques, dont la fonction est de décrire aussi bien les propriétés syntaxiques de ce même langage objet (métalangage syntaxique) – comme, par exemple, la dérivabilité (« *derivability* »), la démonstrabilité (« *provability* ») directe ou indirecte, la réfutabilité (« *refutability* »), l'équivalence (« *equipollence* »), la décidabilité (« *decidability* »), etc. (Carnap 1942, p. 169) – que la signification des différents éléments (signes, expressions et énoncés) dont il se compose, en attribuant, notamment, des « valeurs de vérité » (« *truth-values* ») aux énoncés de ce dernier, sur la base de certaines conditions qui sont à la fois suffisantes et nécessaires pour que l'on puisse considérer tel ou tel énoncé du langage objet comme étant vrai, c'est-à-dire sur la base des « conditions de vérités » (« *truth-conditions* ») de l'énoncé en question (métalangage sémantique) (Carnap 1942, p. 22).

Un métalangage, ainsi défini, sert, par conséquent, à décrire toutes les propriétés de son langage objet, si bien que « la totalité de ce qui peut être connu » (« *the sum total of what can be known* ») au sujet du second « et qui peut être dit » (« *and can be said* ») dans le premier constitue ce que Carnap (1942) appelait, toujours en suivant Tarski (1935a), la « métathéorie » (« *metatheory* ») du langage objet en question, formulée dans le métalangage correspondant (Carnap 1942, p. 3-4). En ce qui concerne la sémantique des langages formalisés, les propriétés des langages objets auxquelles

s'intéresse cette dernière sont, notamment, les conditions de vérité de ses énoncés, sur la base d'une conception de la vérité comme propriété logique qui se fonde, à son tour, – comme le rappelle Carnap (1942) lui-même, en faisant référence, encore une fois, à Wittgenstein (1922) – sur le présupposé que « les conditions de vérité d'un énoncé en constituent la signification [*'the truth-conditions of a sentence constitute its meaning'*], et que comprendre [*'understanding'*] cette signification consiste à connaître [*'knowing'*] de telles conditions » (Carnap 1942, p. 28)⁴⁹. C'est précisément pour cette même raison que, dans *Introduction to Semantics*, Carnap (1942) écrit que la théorie de la vérité – comment peut-on définir, de manière rigoureuse, le concept d'« énoncé vrai » (« *true sentence* ») pour un langage objet donné ? – et la partie de la théorie de la déduction logique qui se fonde sur la théorie de la désignation et de la référence – par opposition à celle qui consiste dans l'application de règles purement formelles – relèveraient de la sémantique (Carnap 1942, p. 10). Il en découle que, d'après ce qu'écrivait Carnap (1942) en 1942, la « syntaxe logique » (« *logical syntax* »)⁵⁰ du langage (Carnap 1942, p. 9) se distinguerait aussi bien de la pragmatique que de la sémantique des langages formels en ceci qu'elle ferait abstraction aussi bien du locuteur que des référents (« *designata* ») des expressions du langage en question (c'est-à-dire de ce qu'elles désignent), pour se concentrer uniquement sur les relations logiques qui existent entre ces dernières. Toujours dans *Introduction to Semantics*, Carnap (1942) précise également qu'une enquête, un concept ou une méthode qui relève de l'analyse du langage est appelé « formel » (« *formal* ») lorsqu'il ne concerne que la forme des expressions auxquelles il s'applique, c'est-à-dire lorsqu'il ne concerne que « les types de signes qui figurent dans une expression donnée et l'ordre dans lequel ils y figurent » (« *the kinds of signs occurring in an expression and the order in which they occur* »), si bien que la syntaxe logique coïncide, *in fine*, avec l'analyse « formelle » du langage (Carnap 1942, p. 10). Il s'ensuit que la syntaxe logique du langage, telle que la présentait Carnap (1942) en 1942, diffère de la sémantique et de la pragmatique non seulement parce qu'elle a trait uniquement aux relations logiques

⁴⁹ « 4.024 – Comprendre une proposition, c'est savoir ce qui a lieu quand elle est vraie [*'To understand a proposition means to know what is the case if it is true'*]. (On peut donc la comprendre sans savoir si elle est vraie.) On la comprend quand on comprend ses constituants » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 53).

⁵⁰ Carnap (1942) précise, en effet, qu'il existe une différence entre la syntaxe comme branche de l'analyse des langages formalisés, c'est-à-dire la « syntaxe logique » (« *logical syntax* »), et la syntaxe comme branche de la sémiotique, ou de la linguistique générale, c'est-à-dire comme « théorie de la construction de phrases à partir de mots » (« *the theory of the construction of sentences out of words* »), qu'il appelle « syntaxe grammaticale » (« *grammatical syntax* »). Le domaine de la syntaxe grammaticale, précise Carnap (1942), « est, d'une part, plus étroit que le premier parce qu'il ne contient pas la théorie de la déduction formelle [*'the theory of formal deduction'*], et, d'autre part, plus large parce qu'il ne se limite pas à l'analyse formelle, mais formule également des règles qui portent sur les référents des expressions linguistiques [*'formulates rules which refer to designata'*] » (Carnap 1942, p. 239).

qu'entretiennent des expressions linguistiques données, lorsqu'on les conçoit comme étant de simples suites de signes que l'on a disposés selon un certain ordre, mais également en ceci qu'elle a trait, plus généralement, à la forme logique d'un certain langage formalisé.

Cet autre aspect de la définition du concept de syntaxe logique que donnait Carnap (1942) en 1942 rappelle, par conséquent, la manière dont il avait expliqué ce même concept huit ans auparavant, et cela précisément dans les pages de *Die logische Syntax der Sprache*. Dans cet autre ouvrage, contrairement à la conception classique de la logique comme forme d'analyse du langage qui s'occuperait également de questions relatives « à la signification et au sens » (« *Bedeutung und Sinn* ») des énoncés (Carnap 1934, p. 206), Carnap (1934) maintient, en effet, que la « théorie de la connaissance » (« *Erkenntnistheorie* »), conçue comme « logique des sciences » (« *Wissenschaftslogik* ») – c'est-à-dire comme « ensemble de questions » (« *Fragenkomplex* ») qui a pour objet « l'analyse logique de la science [*logische Analyse der Wissenschaft*]', de ses énoncés, de ses concepts, de ses théories » (Carnap 1934, p. 205) – se réduirait, précisément, à la « syntaxe du langage des sciences » (« *Syntax der Wissenschaftssprache* ») (Carnap 1934, p. 207). En 1934, par « syntaxe (logique) d'un langage donné » (« *(logische) Syntax einer Sprache* »), Carnap (1934) entendait, ainsi, « la théorie formelle des formes linguistiques d'un langage donné [*die Theorie der Sprachformen dieser Sprache*]' : l'inventaire systématique des règles formelles [*systematische Aufstellung formaler Regeln*]' qui valent pour le langage en question, ainsi que le développement des conséquences que l'on peut tirer de ces mêmes règles [*Entwicklung der Konsequenzen aus diesen Regeln*]' » (Carnap 1934, p. 1), où « la signification d'un signe [*the meaning of a sign*]' ne saurait jouer aucun rôle ; il faut que la syntaxe soit établie sans pour autant faire état de la signification d'un signe, elle ne peut que supposer seulement la description des expressions [*only the description of expressions may be presupposed*]' » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 47-48). Autrement dit, Carnap (1934) affirme ici, en se situant encore une fois dans la droite ligne de Wittgenstein (1922)⁵¹, que le

⁵¹ « 4.122 – Nous pouvons en un certain sens parler de propriétés formelles des objets et des états de choses [*formal properties of objects and states of affairs*]', et respectivement des propriétés de structure des faits [*structural properties of facts*]', et dans le même sens de relations formelles et de relations de structures [*formal relations and structural relations*.'.]. (Au lieu de propriété d'une structure, je parle aussi de 'propriété interne' [*internal property*]' ; au lieu de relation des structures [*structural relation*]', 'relation interne' [*internal relation*]'). J'introduis ces expressions en vue de montrer la raison de la confusion largement répandue chez les philosophes entre les relations internes et les relations proprement dites (externes) [*relations proper (external relations)*']. » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 59). Ce que Wittgenstein (1922) appelle ici les « relations formelles » ou « relations des structures » ne sont donc rien d'autre que des relations syntaxiques, au sens de Carnap (1934), qui existent entre les termes dont se composent les énoncés qui décrivent les états de choses en question, ainsi qu'entre ces mêmes énoncés. Néanmoins, contrairement à Carnap (1934), Wittgenstein (1922) maintenait également que « la subsistance [*the existence*]' de telles propriétés et relations internes

but de la théorie de la connaissance, et donc également de la philosophie en général, consisterait à décrire et à éclaircir les aspects formels du langage de telle ou telle science, voire de la science en général, sans s'occuper de ce que signifient les termes ou les énoncés qui constituent ce même langage, en mettant au jour, par ce même biais, les caractéristiques structurelles de ce dernier. Ce faisant, à cette étape particulière de sa réflexion, Carnap (1934) n'opérait aucune distinction entre syntaxe et sémantique, en réduisant ainsi la seconde à la première – du moins en ce qui concernait l'analyse des langages formels⁵². Cela lui permettait, précisément, de prôner une conception de la philosophie comme étant une théorie de la connaissance qui se réduirait, en dernière instance, à une métathéorie syntaxique du langage de la science. Une telle métathéorie serait, en outre, formulée dans un métalangage partiellement formalisé – en ceci que les composantes linguistiques spécifiques qu'il possède, en plus des éléments dont se compose son langage objet, consisteraient dans un mélange de langage naturel (allemand, anglais, français, etc.) et de « notation syntaxique » visant à décrire les caractéristiques formelles du langage objet en question – qui aurait pour langage objet le langage des sciences elles-mêmes, considéré uniquement du point de vue de ses propriétés formelles. Autrement dit, dans le cadre d'une telle conception, que l'on pourrait qualifier de « syntaxique », la philosophie se réduirait, en tant que théorie de la connaissance, à un ensemble de règles, de définitions et de théorèmes qui portent sur les types logiques auxquels appartiennent les signes qui sont présents dans les expressions du langage objet en question, ainsi qu'à l'ordre dans lequel ils y figurent, et non pas à ce que désignent ces mêmes expressions. C'est précisément en cela que consiste, par conséquent, la conception syntaxique de la théorie de la connaissance comme analyse de la logique du langage des sciences que Carnap (1934, 1936a, 1936b, 1937) a développée tout au long des années 1930, avant d'élaborer une véritable théorie de la distinction entre syntaxe et sémantique dans les langages

ne peut...pas être affirmée dans des propositions, mais elle se montre dans les propositions qui figurent ces états de choses et traitent de ces objets [*'this makes itself manifest in the propositions that represent the relevant states of affairs and are concerned with the relevant objects'*] » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 59), c'est-à-dire que les propriétés et les relations syntaxiques auxquelles a trait la philosophie, en tant que logique des sciences, ne seraient pas elles-mêmes exprimables au moyen de ce que Carnap (1934) lui-même qualifiait d'« énoncés syntaxiques » (« *syntaktische Sätze* »). Voir Carnap (1934, p. 208-210).

⁵² Carnap (1934) considérait, en effet, que l'étude des significations que l'on associait aux mots (« *Wörter* ») en général revenait à la « sémasiologie » (« *Semasiologie* »), c'est-à-dire à « la branche des sciences du langage qui analyse les significations des expressions des langages historiquement donnés » (« *Teil der Sprachwissenschaft, die Bedeutungen der Ausdrücke der geschichtlich gegebenen Sprachen untersucht* ») (Carnap 1934, p. 9), et donc non pas celles des signes dont se composent les langages formels.

formalisés, sur le modèle des travaux de Tarski (1935a, 1944)⁵³, ainsi qu'à la suite des résultats qu'avait obtenus Kurt Gödel (1931) dans sa tentative de démontrer qu'il existe, dans des systèmes formels tels que « le système des *Principia Mathematica* » (« *das System der Principia Mathematica* ») et « le système axiomatique de la théorie des ensembles établi par Zermelo-Fraenkel » (« *das Zermelo-Fraenkelsche System Axiomsystem der Mengenlehre* »), « des problèmes relativement simples concernant la théorie des entiers [*Probleme aus der Theorie der gewöhnlichen ganzen Zahlen*'] que l'on ne saurait trancher sur la base de [leurs propres] axiomes [*sich aus den Axiomen nicht entscheiden lassen*'] » (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 108), et donc que tout système d'une telle nature, c'est-à-dire purement syntaxique, est nécessairement incomplet, en ceci qu'il ne permet pas de formuler une démonstration pour chacune des vérités qui correspondent aux théorèmes de l'arithmétique⁵⁴. Cela dit, en quoi la manière dont nous venons de caractériser cette

⁵³ Comme l'explique Pierre Wagner dans son commentaire en guise d'introduction à Carnap (2015a), « un des buts de Carnap était de 'rendre le métalangage plus précis, afin qu'il soit possible d'y construire un système logique exact pour la métalogue'. Or le principal caractère de ce système était que les définitions des concepts de la métalogue (analyticité, prouvabilité, indépendance logique entre énoncés, dérivabilité à partir d'un ensemble de prémisses, etc.) ne devaient dépendre que de la *forme* des expressions du langage-objet, et en aucun cas de leur *signification*. Plus précisément, eu égard à la méthode d'analyse en usage dans le métalangage, le principe qu'un empiriste se devait de respecter était de ne faire appel, dans les définitions des concepts métalogiques qu'à la forme et à l'ordre des signes et suites de signes du langage-objet, à l'exclusion de leur *signification* ou de leur *référence*. La métalogue était, en ce sens précis, une *syntaxe logique*, et le métalangage un langage de syntaxe. En fait, dès la fin des années trente, cette méthode d'analyse allait être complétée par une méthode sémantique inspirée des travaux de Tarski, mais l'usage de concepts sémantiques (vrai, logiquement vrai, désignation, etc.) est postérieur » aux travaux que Carnap a rédigés jusqu'à cette période-là, si bien que, dans ces derniers, il « ne fait appel qu'à des concepts métalogiques syntaxiquement définis, estimant encore que toute question proprement logique peut être résolue par les moyens qu'offre une analyse syntaxique du langage » (Carnap 2015a, p. 18).

⁵⁴ Il faut, néanmoins, rappeler que Carnap (1934) a d'emblée tenté d'intégrer les résultats de Gödel (1931) à sa propre conception de l'analyse de la syntaxe logique des langages formels. En effet, dans *Die logische Syntax der Sprache*, Carnap (1934) construit, dans le but d'en analyser les propriétés formelles, deux langages purement syntaxiques, à savoir le « langage I » (« *Sprache I* »), qui n'est rien d'autre qu'« un langage pour l'arithmétique récursive primitive » (« *a language for primitive recursive arithmetics* »), et le « langage II » (« *Sprache II* »), qui consiste, en revanche, dans « la théorie simple des types accompagnée de l'axiome du choix » (« *simple theory of types plus the axiom of choice* ») (Ricketts 1996, p. 234) et ressemble, par conséquent, à ce que Gödel (1931) appelait « le système des *Principia Mathematica* ». Il tâche, par la suite, de définir, dans un métalangage syntaxique approprié, les concepts de « logiquement valide » (« *logisch gültig* », « *L-gültig* ») et de « logiquement contre-valide » (« *logisch wider-gültig* », « *L-wider-gültig* ») de telle sorte qu'il soit possible de les appliquer à tous les énoncés mathématiques qui appartiennent aux deux langages en question, et donc de les considérer comme tenant lieu de définitions purement syntaxiques des concepts d'« analytique » (« *analytisch* ») et de « contradictoire » (« *kontradiktorisch* ») (Carnap 1934, p. 135-139). Néanmoins, l'une des conséquences principales des deux théorèmes d'incomplétude de Gödel (1931) consiste, précisément, en ceci

conception syntaxique de la philosophie comme théorie de la connaissance, que Carnap (1934, 1942) a élaborée au cours des années 1930, nous permettrait-elle d'élaborer une interprétation alternative de la façon dont ce dernier concevait la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, ainsi que la nature de la philosophie comme théorie de la connaissance, dans *La Construction logique du monde* ?

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de mieux comprendre en quoi consistent les problématiques qui font l'objet de la philosophie, comme théorie de la connaissance, d'après la conception syntaxique que nous venons de décrire. Dans *Die logische Syntax der Sprache*, Carnap (1934) dresse, en effet, une distinction fondamentale entre deux types de questions, à savoir les « questions d'objets » (« *Objektfragen* ») et les « questions logiques » (« *logische Fragen* »). Plus précisément, les premières portent sur les propriétés et les relations qui caractérisent les objets constituant un certain domaine du réel, alors que les secondes portent sur les propriétés et les relations que l'on peut attribuer aux « énoncés, concepts, théories, etc. » (« *Sätze, Begriffe, Theorien, usw.* ») qui font référence à ces mêmes objets (Carnap 1934, p. 203)⁵⁵. En philosophie, poursuit Carnap

que, si l'on considère un langage formel, « non contradictoire » (« *widerspruchsfrei* »), *S* qui « contient une arithmétique » (« *die eine Arithmetik enthält* »), et qui contient, donc, également « une syntaxe arithmétisée permettant de décrire ses propres caractéristiques formelles » (« *eine arithmetisierte Syntax von sich selbst* »), il existe dans ce même langage des énoncés mathématiques dont on ne peut pas démontrer l'analyticité, si l'on se limite à utiliser une telle syntaxe interne, sous peine de tomber dans des « antinomies » (« *Antinomien* ») (Carnap 1934, p. 163-164). Il en découle que « si *S* est logiquement consistant [*'konsistent'*] ou du moins non contradictoire, alors le prédicat 'analytique en *S*' [*'analytisch in S'*] ne peut pas être défini [*'definiert'*] en *S* » lui-même, ce qui vaut également pour le prédicat « contradictoire en *S* » (« *kontradiktorisch in S* »), ainsi que pour d'autres prédicats que l'on peut former, toujours en *S*, sur la base de concepts purement syntaxiques (Carnap 1934, p. 164). Carnap (1934) en conclut, ainsi, que « chaque système arithmétique [*'jedes arithmetische System'*] est donc lacunaire [*'lückenhaft'*]. Il est, cependant, possible de définir tout concept mathématique [*'jeder mathematische Begriff'*] dans un système adéquat à ce but [*'in einem geeigneten System'*] et de déterminer la valeur de vérité de tout énoncé mathématique [*'jeder mathematische Satz'*] dans un système adéquat à ce but. Mais il n'existe pas de système unique [*'kein einzelnes System'*] qui contienne tous les concepts mathématiques et les démonstrations de tous les énoncés mathématiques valides [*'alle mathematische Begriffe und die Beweise aller gültigen mathematischen Sätze'*]. Les mathématiques requièrent une suite infinie de langages toujours plus riches [*'eine unendliche Reihe immer reicherer Sprachen'*] (Carnap 1934, p. 165). De cette manière, Carnap (1934) préfigure « une conception ouverte de la syntaxe » (« *an open-ended conception of syntax* ») (Ricketts 1996, p. 235), c'est-à-dire une conception de la syntaxe comme système formel riche, qui ne saurait se réduire à un ensemble minimal de règles. Une telle conception soulève, néanmoins, des problèmes d'interprétation au sujet d'autres aspects de la manière dont Carnap (1934) envisageait l'analyse de la syntaxe logique des langages formalisés, ainsi qu'au sujet de la manière dont il concevait l'application des résultats d'une telle analyse à des problématiques scientifiques, telles que les controverses autour des fondements des mathématiques. Pour plus de précisions à ce sujet, voir, par exemple, Ricketts (1996) et Friedman (1992).

⁵⁵ « Mais lorsqu'il s'agit d'un domaine d'objets effectif, c'est-à-dire un domaine d'objets non logique [*'von einem nicht-logischen, eigentlichen Objektbereich'*], la différence entre les questions d'objets et les questions logiques devient claire.

(1934), les questions d'objets sont soit des questions métaphysiques, c'est-à-dire des questions qui portent sur des entités qui n'existent dans le domaine d'objets d'aucune autre discipline – comme, par exemple « les Choses en soi, le Transcendant, l'Absolu » (« *Dinge an sich, das Transzendente, das Absolute* ») – (Carnap 1934, p. 203-204), soit des questions qui concernent des objets qui tombent dans les domaines d'autres sciences – comme, par exemple, « l'homme, la société, le langage » (« *den Menschen, die Gesellschaft, die Sprache* ») – (Carnap 1934, p. 204), soit des questions logiques « sous des habits trompeurs » (« *in irreführender Einkleidung* ») (Carnap 1934, p. 205). Il en conclut, par conséquent, que les questions d'objets auxquelles se sont traditionnellement intéressés les philosophes sont soit des « *simili-questions* » (« *Scheinfragen* ») métaphysiques, c'est-à-dire des énoncés qui ont l'apparence d'une question, mais qui sont, en réalité, dépourvus de signification⁵⁶, soit des questions qui relèvent de telle ou telle science particulière, soit, justement, des « *pseudo-questions d'objets* » (« *Pseudofragen* ») et donc des questions qui sont, en vérité, de nature logique. Il en découle que, dans *Die logische Syntax der Sprache*, les seules questions que Carnap (1934) considère comme étant pertinentes pour l'analyse syntaxique du langage des sciences, c'est-à-dire pour la théorie de la connaissance et pour la philosophie en général, sont précisément les questions logiques, et non pas les questions d'objets. Une telle distinction en rappelle, néanmoins, une autre, que Carnap (1928) opère dans *La Construction logique du monde* elle-même, lorsqu'il écrit que toute relation (« *Beziehung* ») entre des objets « pose deux sortes de problèmes » (« *zwei Probleme verschiedener Art* »). D'une part, elle pose un « problème de correspondance » (« *Zuordnungsproblem* »), qui renvoie à la question suivante : « pour quelles paires d'objets la relation existe-t-elle ? Plus précisément, comment énoncer la loi générale de correspondance [*das allgemeine Gesetz der Zuordnung*'] de la relation à examiner ». D'autre part, elle pose également « le problème de l'essence de la relation » (« *Wesensproblem* »), qui consiste à se demander « non plus

Par exemple, dans le domaine de la zoologie, les questions d'objets concernent les propriétés des animaux [*die Eigenschaften der Tiere*'], les relations des animaux entre eux ou à d'autres objets [*die Beziehungen der Tiere untereinander und zu andern Objekten*'], etc. ; les questions logiques concernent, en revanche, les énoncés de la zoologie [*die Sätze der Zoologie*'], leurs connexions logiques [*logische Zusammenhänge*'], la nature logique des constructions conceptuelles que l'on utilise en zoologie [*der logische Charakter der in der Zoologie vorkommenden Begriffsbildungen*'], la nature logique des possibles hypothèses et théories, ou de celles qui ont effectivement été établies [*der logische Charakter der möglichen oder wirklich aufgestellten Hypothesen und Theorien*'] (Carnap 1934, p. 203).

⁵⁶ Une *simili-question* est donc un *simili-énoncé* (« *Scheinsatz* »), c'est-à-dire « une suite de mots d'une langue donnée qui a l'apparence d'un énoncé mais qui ne l'est pas parce qu'elle n'a pas de sens. Il y a deux espèces de *simili-énoncés* : 1) Ceux qui contiennent un ou plusieurs mots dépourvus de sens [d'après les critères qui découlent de la théorie vérificationniste de la signification] ; 2) Ceux qui sont formés contrairement aux critères de la syntaxe logique » (Soulez *et al.* 2010, p. 251).

seulement quels objets sont liés par la relation, mais ce qu'il en est vraiment de la relation qui attribue chaque terme l'un à l'autre, ce par quoi ils sont liés », et donc ce qu'il en est de « l'essence de la relation elle-même » (« *das Wesen der Beziehung selbst* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 80-81). C'est pourquoi Carnap (1928) tient à préciser, toujours dans *La Construction logique du monde*, que seuls les problèmes de la première sorte relèvent de la reconstruction rationnelle du savoir, c'est-à-dire de la science ou de la philosophie comme théorie de la connaissance, en ceci que, afin d'y répondre, il suffit d'établir une « dépendance fonctionnelle » (« *funktionale Abhängigkeit* »), au sens mathématique du terme « fonction » (« *Funktion* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 238), entre les deux objets qu'entretiennent la relation en question, de telle sorte que l'on puisse affirmer que « si l'antécédent (*Vorderglied*) est de telle ou telle nature [*'hat die und die Beschaffenheit'*], alors le conséquent (*Hinterglied*) est de telle ou telle nature (ou inversement) » (Carnap 1928 ; 2002, p. 80). Il s'agit, en d'autres termes, non seulement de problèmes de correspondance, mais également de « problèmes constitutionnels » (« *konstitutionale Probleme* »), dans la mesure où leur résolution est interne au système de constitution lui-même (Carnap 1928 ; 2002, p. 278). Les problèmes de l'autre sorte relèvent, au contraire, de la métaphysique, en ceci qu'ils présupposent non pas l'identification d'une dépendance fonctionnelle de nature logico-mathématique entre les deux objets en question, mais la « réalisation » (« *Realisation* »), c'est-à-dire la « position de la réal-ité » (« *Real-Setzung* »), ou « substantialisation (au sens de la catégorie de la substance) » (« *Substanzialisation (im Sinne der Substanzkategorie)* ») de la relation elle-même comme chose qui existerait en dehors du système de constitution (Carnap 1928 ; 2002, p. 278-279).

Sur la base de ce que nous venons de remarquer, nous pouvons donc établir une correspondance étroite entre les questions d'objets dont parle Carnap (1934) dans *Die logische Syntax der Sprache* et les problèmes d'essence dont il traite dans *La Construction logique du monde*, en ceci que, dans les deux cas, il s'agirait soit de problèmes qui concernent des objets naturels, et qui ont donc trait aux sciences empiriques, soit de problèmes qui concernent des substances, et qui ont donc trait à la métaphysique. Parallèlement, nous pouvons mettre en relation les questions logiques dont parle Carnap (1928) dans le premier ouvrage et les problèmes de correspondance dont il est question dans l'autre, en ceci que, dans les deux cas, il s'agirait de problèmes qui relèveraient de la philosophie, c'est-à-dire de la théorie de la connaissance, en tant que problèmes qui ont trait à des relations d'implication ou de dépendance logique entre concepts, voire entre objets qui ont été logiquement reconstruits. Ces deux relations de correspondance nous permettent, néanmoins, d'établir également une analogie profonde entre l'analyse de la syntaxe logique du langage des sciences qui fait l'objet du premier ouvrage et la reconstruction rationnelle du savoir qui fait l'objet du second. Autrement dit, bien que Carnap (1936a) ait lui-même fini par dresser une critique du projet qu'il avait esquissé

dans *La Construction logique du monde*, puisqu'il était parvenu à la conclusion que ce dernier portait toujours les stigmates d'une conception traditionnelle de la « *théorie de la connaissance* » (« *Erkenntnistheorie* ») qu'il estimait désormais n'être qu'un « *mélange confus d'éléments psychologiques et logiques* » (« *unklare Mischung aus psychologischen und logischen Bestandteilen* ») (Carnap 1936a ; Bonnet & Wagner 2006, p. 520), nous pouvons, tout de même, identifier dans un tel ouvrage – à la lumière de ce que Carnap (1934) écrivait au sujet de l'analyse de la syntaxe logique du langage des sciences en 1934 – les prémices d'une conception de la reconstruction rationnelle du savoir non pas comme consistant à réduire des concepts et des objets complexes à des perceptions élémentaires, mais plutôt comme consistant à effectuer une double réduction d'énoncés qui ont une certaine forme logique à des énoncés qui ont une autre forme logique : premièrement, la réduction de toutes les questions qui concernent la théorie de la connaissance, et qui sont formulées comme s'il s'agissait de questions d'objets, à des questions logiques qui portent sur les propriétés syntaxique du langage des sciences ; deuxièmement, la réduction, dans le but d'en analyser la signification et d'en justifier la validité, de toutes les questions d'objets qui se posent dans le cadre de telle ou telle science empirique à des questions logiques qui portent sur les relations que des énoncés synthétiques entretiennent avec des énoncés que l'on peut considérer comme des représentations logiques d'états de choses qui sont directement observables⁵⁷. C'est précisément dans un tel but que, dans *Die logische Syntax der Sprache*, Carnap (1934) introduit le concept de « propriété quasi-syntaxique » (« *quasi-syntaktische Eigenschaft* »). Considérons, en effet, une « propriété d'objets » (« *Objekteigenschaft* ») « E_1 », que l'on peut attribuer à quelques-uns des éléments qui constituent un certain domaine d'objets B , en la formulant dans un « langage d'objets » (« *Objektsprache* ») S_1 , c'est-à-dire dans un langage formel qui contient des expressions descriptives, et donc non simplement logiques, qui servent à énoncer, précisément, les propriétés des objets en question. Considérons, en outre, la « propriété syntaxique » (« *syntaktische Eigenschaft* ») « E_2 », que l'on peut attribuer à quelques-uns des expressions du langage S_1 , en la formulant dans le

⁵⁷ Comme l'explique Thomas Ricketts (1996), « une fois qu'ils ont été clarifiés, les *pseudo*-énoncés d'objets [*'pseudo-object statements'*] ne sont rien d'autre que des assertions au sujet de la syntaxe d'un certain langage [*'claims about the syntax of a particular language'*], éventuellement accompagnées d'une injonction à utiliser ou à ne pas utiliser un langage qui présente les caractéristiques syntaxiques que décrivent les énoncés en question. Carnap [(1934)] estime que les énoncés syntaxiques peuvent réaliser, dans la *Wissenschaftslogik*, tous les objectifs clairement formulés [*'serves any clearly conceived purposes'*] que réalisent les *pseudo*-énoncés d'objets. C'est ainsi que le jargon des catégories syntaxiques remplace le jargon des catégories ontologiques [*'talk of syntactic categories replaces talk of ontological categories'*]. Le jargon de la référence peut être supplanté par une analyse des relations syntaxiques entre deux langages [*'syntactic relationships between two languages'*] » (Ricketts 1996, p. 241).

métalangage syntaxique S_2 . D'après la définition que donnait Carnap (1934) d'un tel concept, nous pouvons considérer « E_1 » comme étant une propriété *quasi-syntaxique* du domaine B si et seulement si chaque objet de ce même domaine qui la possède est « désigné » (« *bezeichnet* ») par une « expression » (« *Ausdruck* ») de S_1 qui possède, à son tour, la propriété syntaxique « E_2 » (Carnap 1934, p. 176-177). S'il en est ainsi, en concluait Carnap (1934), « E_1 est une propriété qui est, en quelque sorte, déguisée en propriété d'objets [*'eine gewissermaßen als Objekteigenschaft verkleidete Eigenschaft'*], mais dont la signification [*'Bedeutung'*] est de nature syntaxique [*'nach syntaktischen Charakter'*] » (Carnap 1934, p. 177). Il en découle que, lorsqu'il est possible d'attribuer une propriété *quasi-syntaxique* donnée à un certain domaine d'objets⁵⁸, il est également possible de traduire toutes les questions d'objets qui portent sur cette même propriété, en tant que propriété qui semble être attribuable à des objets, en questions logiques au sujet de la propriété purement syntaxique qui y est corrélée – et qui est ainsi une propriété formelle du langage que l'on utilise pour décrire le domaine d'objets en question – puisque ces deux questions sont liées l'une à l'autre par une relation d'implication réciproque⁵⁹. Il s'ensuit que, dans une telle perspective, le problème qui faisait l'objet de la thèse de l'empirisme classique, c'est-à-dire le problème de savoir s'il existe des phénomènes originaires auxquels on pourrait ramener aussi bien tous les objets que nous percevons que les contenus de toutes nos connaissances, ne concerne pas la philosophie comme théorie de la connaissance, mais la psychologie en tant que science empirique, dans la mesure où il s'agit bien d'une question d'objets. C'est pourquoi, comme l'a affirmé Carnap (1936a) lui-même au cours d'un

⁵⁸ Comme l'observe, encore une fois, Ricketts (1996), « la propriété *entier positif* [*'positive integer'*] est *quasi-syntaxique* [*'quasi-syntactic'*], car elle correspond à la propriété syntaxique [*'syntactic property'*] *numéral cardinal* [*'formal numeral'*] ». En revanche, « la propriété *rouge* n'est pas *quasi-syntaxique*, car l'on peut présumer qu'il n'existe aucune propriété syntaxique qui soit possédée uniquement par les expressions qui désignent des choses rouges » (Ricketts 1996, p. 240-241).

⁵⁹ Comme le rappelle, encore une fois, Quine (1960), traduire un énoncé d'un langage à un autre signifie, en effet, établir une relation de « synonymie » (« *synonymy* ») entre deux assertions, si bien que tout cadre linguistique, tel que nous l'avons défini plus haut, doit comprendre des règles permettant d'établir de telles relations. Mais que signifie le mot « synonymie » dans un tel contexte ? En suivant encore une fois Quine (1960), l'on peut observer qu'un tel concept se définit au moyen d'une notion qui relève de la « sémantique philosophique intuitive » (« *intuitive philosophical semantics* »), c'est-à-dire celle d'« énoncé analytique » (« *analytic sentence* »). Un énoncé analytique est, en effet, un énoncé qui est vrai « simplement en vertu de sa signification » (« *true purely by meaning* ») et non pas en fonction de tel ou tel contenu factuel, comme, par exemple, « aucun célibataire n'est marié », « tous les porcs sont des porcs », ou encore « $2 + 2 = 4$ ». Il en découle que l'on peut définir mutuellement l'analyticité et la synonymie de la manière qui suit : « des phrases sont synonymes si et seulement si leur biconditionnelle [*'biconditional'*] (formée en les reliant par 'si et seulement si') est analytique ; et une phrase est analytique si et seulement si elle est synonyme d'une 'auto-conditionnelle' [*'self-conditional'*] (si p , alors p) » (Quine 1960 ; 1977, p. 108).

congrès international de philosophie scientifique qui s'est tenu en 1935, à Paris, il est nécessaire de reformuler une telle question de manière à la traduire du « mode de discours contentuel...ou...pseudo-matériel » (« *aus der inhaltlichen oder...pseudo-materialen...Redeweise* ») propre à la théorie de la connaissance telle que l'envisageait l'empirisme classique « dans le mode de discours formel » (« *in die formale Redeweise* ») propre à la théorie de la connaissance telle qu'elle était conçue dans l'empirisme logique de Carnap (1928, 1934), c'est-à-dire comme analyse de la syntaxe logique du langage des sciences. C'est ainsi que Carnap (1936a) a proposé de reformuler une telle question de la manière suivante : « Y a-t-il des propositions ultimes auxquelles toutes les propositions synthétiques peuvent être ramenées ? » (« *Gibt es letzte Sätze, auf die alle synthetischen Sätze zurückführbar sind?* ») (Carnap 1936a ; Bonnet & Wagner 2006, p. 523). Ce faisant, il a transformé la question de savoir s'il serait possible de réduire tous les objets de notre perception et tous les contenus de notre connaissance du monde à des phénomènes originaires en une question qui porte sur la possibilité de ramener des énoncés ayant une certaine forme logique à des énoncés ayant une autre forme logique, c'est-à-dire, précisément, en une question que l'on peut traiter dans le cadre de l'analyse de la syntaxe logique du langage.

Nous pouvons donc en conclure que l'empirisme logique que défendait Carnap (1928, 1934, 1936a) dans les années 1930, et dont on peut repérer les prémices dans *La Construction logique du monde*, ne consistait pas à considérer la synthèse entre les fondements des sciences empiriques et les principes généraux, de nature purement formelle et conventionnelle, qui en constituent le volet le plus abstrait comme consistant à prolonger, au moyen des outils de la logique mathématique, le projet de réduction, ontologique et épistémologique, de tout objet et de tout concept aux données sensibles (« *sense data* ») qui caractérisait l'empirisme classique. Bien au contraire, la manière dont Carnap (1928, 1934, 1936a) envisageait la reconstruction rationnelle et formelle du savoir scientifique visait à concilier ces deux aspects de la connaissance en reconstruisant le langage des sciences empiriques sous la forme d'un langage purement syntaxique qui permette de traduire toute question d'objets en une question logique, et cela, encore une fois, dans le but d'élucider les concepts abstraits et les fondements empiriques de ces mêmes sciences⁶⁰. En conséquence, c'est dans une perspective qui est

⁶⁰ Ce faisant, Carnap (1928, 1934) ne s'est donc pas seulement limité à effectuer une synthèse entre l'empirisme « machien » et le conventionnalisme, en remplaçant ces deux positions épistémologiques dans le cadre d'une démarche syntaxique, mais, tout en niant l'existence même de toute sorte de principes synthétiques *a priori*, il a également adopté une posture que l'on pourrait comparer à celle des néokantiens de l'École de Marbourg (Cassirer *et al.* 1998) : alors que les seconds visaient, en effet, à redéfinir ces mêmes principes au prisme des sciences (mathématiques) de la nature, Carnap (1928, 1934) entendait redéfinir le concept empiriste de réduction de la connaissance aux sensations à l'aune de l'analyse logique des aspects formels du langage des sciences empiriques.

avant tout logico-analytique, c'est-à-dire syntaxique, et non pas ontologico-épistémologique – comme semblait le suggérer, en revanche, Quine (1951, 1953) –, qu'il faudrait interpréter l'approche carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir, ainsi que de la nature de la philosophie en tant que théorie de la connaissance, à l'aune de la manière dont Carnap (1928, 1934) lui-même envisageait le dogme de l'analyticité et le dogme du réductionnisme. De plus, une telle interprétation est également confirmée par ce qu'on peut lire dans la préface à la deuxième édition de *La Construction logique du monde*, où Carnap (1961b) présente le but de son approche empiriste comme concernant, justement, « la possibilité de reconstruire rationnellement les concepts de tous les domaines de la connaissance à partir de concepts qui se rapportent au donné immédiat [*das unmittelbar Gegebene*]' » de la sensation (Carnap 1961b ; 2002, p. 45), et précise que, par « reconstruction rationnelle » (« *rationale Nachkonstruktion* »), il entend « la recherche de nouvelles définitions pour d'anciens concepts » (« *das Aufsuchen neuer Bestimmungen für alte Begriffe* ») (Carnap 1961b ; 2002, p. 45). En d'autres termes, Carnap (1961b) affirme ici que le but de la reconstruction logique du savoir, telle qu'elle est conçue dans le cadre de son empirisme logique, consiste à ramener les concepts et les objets des différents domaines scientifiques à des données immédiates de la sensation non pas par le biais d'une réduction directe, à la fois ontologique et épistémologique, mais par l'intermédiaire de définitions conceptuelles. Aux yeux de Carnap (1961b), une telle réduction devait donc s'opérer par l'intermédiaire d'énoncés qui expriment des relations entre concepts, ce qui revient précisément à reformuler la thèse de l'empirisme classique non pas en termes d'une question d'objets, mais en termes d'une question logique, pour reprendre la terminologie qu'utilise ce dernier dans *Die logische Syntax der Sprache* (Carnap 1934).

En outre, Carnap (1961b) précisait également que, afin de pouvoir énoncer de telles définitions, il est nécessaire d'identifier, au préalable, les sources à partir desquelles les concepts en question se sont eux-mêmes constitués. C'est précisément à ce sujet qu'il observait que, même si elles avaient attribué des poids différents aux contributions respectives de ces deux sources, la tradition empiriste et la tradition rationaliste s'étaient toujours trouvées d'accord pour affirmer que tout concept et tout jugement procéderaient du « concours de l'expérience et de la raison » (« *Zusammenwirkung von Erfahrung und Vernunft* »), en ceci que « les sens fournissent le matériau de la connaissance [*das Material der Erkenntnis*]' que la raison organise en un système » (Carnap 1961b ; 2002, p. 45). Toujours selon Carnap (1961b), ce qui avait empêché ces deux courants de la philosophie moderne de reconnaître leur accord sur le fond avait été, d'une part, la méconnaissance de l'importance de la « mise en forme logico-mathématique » (« *die logisch-mathematische Formung* ») des connaissances empiriques dont auraient témoigné, à son avis, les empiristes et, d'autre part, la croyance des rationalistes dans le fait que « la raison ne fournit pas seulement une forme [*Form*]' mais peut, à

partir d'elle-même ('*a priori*'), produire un nouveau contenu [*'neuen Gehalt'*] » (Carnap 1961b ; 2002, p. 45-46). C'est pourquoi, poursuivait Carnap (1961b) lui-même, la démarche qui avait abouti à *La Construction logique du monde* avait consisté, justement, non pas à prolonger la tradition empiriste, mais plutôt à effectuer une synthèse de ces deux traditions, à partir du constat – inspiré par les recherches de Frege (1879), Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) – de « l'importance fondamentale des mathématiques pour la construction du système de la connaissance » (« *die grundlegende Bedeutung der Mathematik für den Aufbau des Systems der Erkenntnis* »), d'une part, ainsi que de « leur caractère purement logique, formel [*'der rein logische, formale Charakter der Mathematik'*], sur lequel repose leur indépendance à l'égard des contingences du monde réel » (Carnap 1961b ; 2002, p. 46)⁶¹, d'autre part⁶². Cet autre extrait de Carnap (1961b) nous montre, ainsi, que c'est précisément dans la tentative d'effectuer une synthèse entre rationalisme et empirisme classique, plutôt que dans celle de prolonger, tout simplement, la thèse fondamentale du second, que nous pouvons trouver les prémices, déjà contenues dans *La Construction logique du monde*, de l'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir par laquelle a fini par se traduire, au cours des années 1930, la manière dont Carnap (1934, 1936a, 1961b) concevait ce que Quine (1951, 1953) appellerait, par la suite, « les dogmes de l'empirisme », à savoir le dogme de l'analyticité et le dogme du réductionnisme. En conséquence, d'une part, une telle approche était étroitement liée à une

⁶¹ C'est ainsi que, toujours d'après Carnap (1961b), la contribution que Wittgenstein (1922), ainsi que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont apportée non seulement aux réflexions de ce dernier, mais également à celle de l'ensemble du « Cercle de Vienne » (« *Wiener Kreis* ») – et donc au développement de l'« empirisme logique » (« *logischer Empirismus* »), ou « positivisme logique » (« *logischer Positivismus* ») (Carnap 1961b ; 2002, p. 46) – aurait consisté à fournir à l'analyse empirique de la connaissance scientifique les outils mathématiques et formels dont elle avait besoin.

⁶² L'on peut trouver, par ailleurs, un argument similaire dans les paragraphes conclusifs de *La Construction logique du monde* elle-même, où Carnap (1928) rejette une interprétation purement rationaliste de sa conception selon laquelle « la science (rationnelle) [*'die (rationale) Wissenschaft'*] non seulement pourrait faire de chaque chose (*Gegenstand*) son objet (*Objekt*), mais encore ne rencontrerait aucune limite, aucune question à laquelle on ne pourrait répondre par principe [*'eine grundsätzlich unbeantwortbare Frage'*] » (Carnap 1928 ; 2002, p. 299). Carnap (1928) objecte, ainsi, que, « au sens de l'ancienne opposition rationalisme-empirisme en théorie de la connaissance » (« *im Sinne des alten erkenntnistheoretischen Gegensatzes Rationalismus-Empirismus* »), il serait plus justifié de qualifier sa conception du savoir scientifique d'« empiriste », puisque, « suivant la théorie de la constitution, toute proposition de la science est au fond une proposition portant sur les relations existant entre les vécus élémentaires [*'jede Aussage der Wissenschaft im Grunde eine Aussage über die zwischen den Elementarerlebnissen bestehenden Beziehungen ist'*], chaque connaissance matérielle (c'est-à-dire non purement formelle) renvoie à l'expérience » (Carnap 1928 ; 2002, p. 299). Il tient, néanmoins, à préciser que l'empirisme dont il s'agit ici n'est pas « un empirisme grossier [*'roher Empirismus'*] compte tenu de la signification que [sa] théorie de la constitution attribue aux composantes formelles (*Formungskomponenten*) de la connaissance » (Carnap 1928 ; 2002, p. 299).

conception de la théorie de la connaissance, et donc de la philosophie elle-même, comme analyse de la syntaxe logique du langage des sciences, c'est-à-dire comme mise en évidence, par l'intermédiaire des concepts et des outils qui sont propres à la logique et aux mathématiques, des relations formelles qui existent entre des énoncés exprimant les « propriétés structurelles » (« *strukturelle Eigenschaften* ») des différents contenus de connaissance que fournit l'expérience empirique, dans le but de réduire les questions d'objets qui se posent dans le cadre de telle ou telle science à des questions logiques qui concernent, précisément, les propriétés syntaxiques du langage de la science en question (Carnap 1928, 1934). D'autre part, cette même approche syntaxique a fini par se concrétiser, toujours au cours des années 1930, dans une conception du corps de toutes les connaissances scientifiques comme n'étant rien d'autre que le système des énoncés qui relèvent de ce que Carnap (1932b) qualifiait de « langage universel de la science »⁶³, et qu'il concevait sur le modèle d'une reconstruction purement syntaxique du langage de la physique (Carnap 1932b). Cela dit, en quoi pourrait donc consister un tel langage ?

Dans l'article qu'il a consacré, en 1932, à l'élucidation de cette problématique, Carnap (1932b) écrit qu'un tel langage consisterait essentiellement en un « vocabulaire » (« *Vokabular* ») et en une « syntaxe » (« *Syntax* »). Par « vocabulaire », il entend ici l'ensemble des mots qui apparaissent dans le langage en question, alors que, par « syntaxe », il entend les règles d'après lesquelles ces mots peuvent être utilisés afin de construire des énoncés, ou bien d'après lesquelles un énoncé donné peut être transformé en un autre, qu'il appartienne ou non au même langage. Mais alors, quid de la sémantique ? Comme nous l'avons remarqué précédemment, à cette étape de sa réflexion, Carnap (1932b) considérait que la sémantique d'un langage donné serait déjà « contenue » (« *enthalten* ») dans sa syntaxe, dans la mesure où la détermination du « sens » (« *Sinn* ») des énoncés et de la « signification » (« *Bedeutung* ») des mots s'opérerait par le biais de certaines règles syntaxiques, et plus précisément soit par le biais de règles de « traduction » (« *Übersetzung* ») – c'est-à-dire par le biais de règles qui permettent de transformer un mot ou une expression qui relève d'un langage donné en un mot ou en une expression qui relève d'un autre langage –, soit par le biais de règles de « définition » (« *Definition* ») – c'est-à-dire par le biais de règles de transformation de mots ou d'expressions d'un langage donné en mots ou expressions de ce même langage, qu'il s'agisse de « définitions nominales » (« *Nominaldefinitionen* »), et donc descriptives, ou de « définitions par exhibition » (« *Definitionen durch Aufweisung* »), et donc ostensives (Carnap 1932b ; Bonnet &

⁶³ Carnap (1932b) précise qu'un langage se dit « universel » (« *Universalsprache* ») si son vocabulaire et sa syntaxe sont à même d'exprimer tous les énoncés qui soient doués de sens. Dans le cas contraire, c'est-à-dire au cas où il existerait des énoncés doués de sens qui seraient pourtant intraduisibles en énoncés du langage en question, il faudrait parler de « sous-langage » (« *Teilsprache* »).

Wagner 2006, p. 325-326). Conformément à la conception de la théorie de la connaissance comme analyse de la syntaxe logique du langage des sciences dont nous avons parlé plus haut, et qui consiste justement dans la réduction des toutes les questions d'objets qui relèvent des sciences empiriques à des questions logiques, la manière dont Carnap (1932b) envisage ici le langage universel de ces mêmes sciences est purement « formelle » (« *formal* »), en ceci qu'elle n'a aucun rapport aux référents des mots et aux contenus des énoncés qui constituent le langage en question. Une telle définition de la structure du langage universel des sciences soulève, néanmoins, la question de savoir en quoi pourraient consister les modalités de « confirmation empirique » (« *empirische Nachprüfung* ») des énoncés qu'il permet de formuler. Autrement dit, en quoi s'opérerait, concrètement, la détermination empirique du sens des énoncés et de la signification des mots d'un tel langage, en accord avec la théorie vérificationniste de la signification ? De plus, de quelle manière ces mêmes modalités d'interprétation empirique des mots et des énoncés du langage universel des sciences, tel que le concevait Carnap (1932b), pourraient-elles nous permettre de mieux comprendre en quoi la conception syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique que prônait ce dernier a posé les jalons pour le développement de la conception classique des théories scientifiques ?

1.3 L'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir et le problème de la signification empirique des hypothèses scientifiques : la science comme cadre linguistique

Dans *La langue de la physique comme langue universelle de la science (Die Sprache der Physik als Universalsprache der Wissenschaft)*, Carnap (1932b) tâche de répondre non seulement à la question de savoir en quoi le langage de la physique, une fois reconstruit dans une forme purement syntaxique, pourrait constituer un « langage universel de la science » (« *Universalsprache der Wissenschaft* »), mais également à celle de savoir en quoi il serait possible de soumettre le savoir scientifique, en tant que « système de propositions établi à l'aide de l'expérience » (« *System von Sätzen, das an Hand der Erfahrung aufgestellt wird* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 327), à des tests expérimentaux, afin d'en déterminer, à la fois, la validité et la signification. Ce texte marque, ainsi, un premier pas dans la transition de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique telle qu'elle est présentée dans *La Construction logique du monde* vers la conception syntaxique de la reconstruction rationnelle dont nous avons parlé dans la section précédente. En 1928, Carnap (1928) avait écrit, en effet, que « l'axiomatisation d'une théorie [*Axiomatisierung einer Theorie*']

consiste à organiser la totalité de ses propositions [*‘sämtliche Aussagen der Theorie’*] en un système déductif [*‘Deduktionssystem’*] dont les axiomes forment la base, et l’ensemble de ses concepts [*‘sämtliche Begriffe der Theorie’*] en un système de constitution [*‘Konstitutionssystem’*] dont les concepts fondamentaux forment la base » (Carnap 1928 ; 2002, p. 58). Il en avait donc conclu que le but de *La Construction logique du monde* devait consister à mener à bien cette seconde tâche, qui aurait jusque-là été délaissée au profit de la première, c’est-à-dire à constituer systématiquement les concepts de « l’ensemble de la science unitaire » (« *das Begriffssystem...der einen Gesamtwissenschaft* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 59). En 1932, en revanche, Carnap (1932b) envisageait la science unitaire non plus comme étant, avant tout, un système unifié de concepts, mais comme étant « le système des propositions intersubjectivement valides » (« *das System der intersubjektiv gültigen Sätze* ») (Carnap 1928 ; 2002, p. 341), c’est-à-dire le système des énoncés vrais dont la signification cognitive est accessible à tous les sujets qui les prononcent, les écrivent, les entendent, ou les lisent. De plus, il concevait un tel système d’énoncés comme étant formulé dans un langage particulier, également de nature « intersubjective » (« *intersubjektiv* »), qui lui serait indissociable, si bien que Carnap (1932b) parlait explicitement de « langage-système » (« *System-sprache* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 330). Mais comment pourraient donc s’articuler les différents énoncés qui constituent un tel système et en quoi serait-il possible de leur attribuer une quelque signification cognitive ? De même que dans le cas du système de constitution dont il avait esquissé la structure en 1928, Carnap (1932b) considérait le langage-système dont il est question dans cet autre écrit comme s’étageant sur plusieurs « niveaux de constitution » (« *Konstitutionsstufen* »), dont le plus élevé serait celui des « lois de la nature » (« *Naturgesetze* »), c’est-à-dire des propositions générales qui sont supposées décrire l’état de tout système physique, en tout moment et en tout lieu, d’où l’on pourrait déduire les « propositions singulières » (« *singuläre Sätze* »), c’est-à-dire les propositions décrivant une configuration « espace-temps-position » (« *Raum-Zeit-Stelle* ») donnée, qui constitueraient, ainsi, le niveau immédiatement inférieur du système-langage de la science (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 331). Néanmoins, toujours telles que les envisageait Carnap (1932b), les lois de la nature et les propositions singulières seraient, les unes au même titre que les autres, des hypothèses (« *Hypothesen* ») de nature conventionnelle : les lois de la nature ne sauraient être strictement déduites d’aucun ensemble fini de propositions singulières, mais elles pourraient seulement, dans le meilleur des cas, « se confirmer toujours plus au vu de ces dernières » (« *sich an solchen nur... immer mehr bewähren* »), alors que les propositions singulières ne sauraient être strictement déduites ni les unes des autres, ni de quelques observations directes. Il en découle que « l’élaboration du système de la science comporterait donc toujours un élément conventionnel [*‘ein konventionelles Moment’*] : la forme du système n’est jamais

complètement établie par l'expérience [*'durch die Erfahrung festgelegt'*], elle est toujours également déterminée par des conventions [*'durch Festsetzungen mitbestimmt'*] » (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 331). Cela dit, vu que les énoncés qui constituent un tel système sont, tout de même, des énoncés synthétiques, comment pourrait-on en déterminer la signification empirique, en conformité avec la théorie vérificationniste de la signification ?

La thèse que défend Carnap (1932b) dans cet article est que toute opération de « confirmation empirique » (« *empirische Nachprüfung* ») du savoir scientifique aurait pour objet non pas une « proposition isolée » (« *der einzelne Satz* »), mais « le système des propositions » (« *das System der Sätze* ») scientifiques, dans sa totalité, voire un « sous-système » (« *Teilsystem* ») donné, « à l'aide » (« *an Hand* ») d'un ensemble de propositions d'un type particulier, que Carnap (1932b) appelait « propositions protocolaires » (« *Protokollsätze* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 327). Plus précisément, de telles propositions seraient « des propositions qui contiennent le protocole d'origine [*'das ursprüngliche Protokoll'*] » (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 327) des expériences, ou des observations, que l'on peut anticiper en les déduisant des énoncés scientifiques que l'on souhaite mettre à l'épreuve. Autrement dit, il s'agirait de propositions qui constituent une représentation plus abstraite et plus simplifiée des énoncés que l'on peut trouver dans les protocoles expérimentaux, ou observationnels, qui sont concrètement utilisés par des scientifiques afin de réaliser les expériences, ou les observations, dont on pourrait se servir pour tester telle ou telle proposition singulière, ou plus précisément pour en tester les conséquences empiriques. Toujours sur la base de ce qu'écrivait Carnap (1932b) en 1932, nous pouvons également affirmer, en adoptant ainsi un « mode de discours formel » (« *formale Redeweise* »), que les propositions protocolaires sont des propositions qui ne contiennent aucun nom de qualités abstraites, comme, par exemple, « bleu » (« *Blau* »), mais seulement des noms de qualités et d'entités qui sont directement observables. Dans un « mode de discours matériel » (« *inhaltliche Redeweise* »), cela signifie que de telles propositions se distinguent des autres en ceci qu'elles décrivent soit « des formes faisant partie d'un domaine sensoriel particulier » (« *Teilgestalten der einzelnen Sinnesgebiete* ») – comme, par exemple, des configurations visuelles particulières, telles que celle qui est décrite par la proposition protocolaire « maintenant cercle rouge » (« *jetzt roter Kreis* ») –, soit des « champs sensoriels tout entiers » (« *die ganzen Sinnesfelder* ») – comme, par exemple, tout ce qu'un certain observateur est capable de voir à un instant donné –, soit « l'expérience vécue intégrale d'un instant, prise dans son unité, non encore divisée en domaines sensoriels » (« *das Gesamterlebnis eines Augenblicks als Einheit, noch unzerlegt* »).

in Sinnesgebiete ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 330)⁶⁴. Il en découle que, bien qu'elles relèvent, justement, d'un « langage protocolaire » (« *Protokollsprache* ») particulier, ou « langage phénoménal » (« *Phenomenalsprache* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 328), et donc non pas du langage de la science en tant que tel, ces propositions constituent la base du système des connaissances scientifiques comme « langage-système » (« *System-sprache* »). Quoique l'on soit tenté de croire qu'un tel langage protocolaire, ou phénoménal, consisterait en une multiplicité de langages qui ne pourraient être employés « *qu'en monologue* » (« *nur monologisch* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 349), en ceci qu'ils se limiteraient à décrire les contenus des vécus individuels des sujets particuliers qui les utilisent, faire cela signifierait commettre, comme le précisait Carnap (1932b) lui-même, une erreur induite par l'usage du mode de discours contentuel. Considérons, par exemple, la proposition protocolaire, « *p* », « (Le sujet *S* voit) maintenant du rouge » (« *S sieht jetzt Rot* ») et la « proposition physique » (« *physikalische Satz* »), « *P* », « Le corps *S* est maintenant en train de voir du rouge » (« *Der Körper S ist jetzt rotsehend* »), qui diffère d'une proposition singulière de la physique en ceci qu'elle fait référence à un « domaine spatio-temporel étendu » (« *ein ausgedehntes Raum-Zeit-Gebiet* »), et non pas à « un point spatio-temporel particulier » (« *ein einzelner Raum-Zeit-Punkt* »), ainsi qu'à « une large classe de distributions » (« *eine umfangreiche Klasse [von] Verteilungen* ») « des valeurs de grandeurs d'états physiques qui apparaissent dans les lois de la nature » (« *derjenigen physikalischen Zustandsgrößen, die in den Naturgesetzen auftreten* ») – qui est supposée décrire l'état psycho-physique du sujet *S*, en tant que « corps physique » (« *Körper* »), à l'instant en question – et non pas à « une certaine distribution » particulière de cette même nature (« *bestimmte Wertverteilung* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 353). Cela dit, il n'en demeure pas moins possible de regarder les propositions physiques

⁶⁴ Carnap (1932b) précisait également qu'il y avait deux autres manières possibles de concevoir le contenu, ou la forme, des propositions protocolaires. La première consistait à considérer les propositions protocolaires comme des énoncés qui décriraient « les impressions sensibles et les sentiments les plus simples » (« *die einfachsten Sinnesempfindungen und Gefühle* »), et qui auraient donc la forme suivante : « maintenant joie » (« *jetzt Freude* »), « maintenant ici bleu, là rouge » (« *jetzt hier Blau, dort Rot* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 329). La seconde consistait, en revanche, à regarder de telles propositions comme des énoncés qui décriraient « les choses » (« *die Dinge* »), c'est-à-dire des corps tridimensionnels en tant que tels, et qui auraient donc la forme suivante : « il y a un cube rouge sur la table » (« *Auf dem Tisch liegt ein roter Würfel* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 330). Carnap (1932b) ajoutait, néanmoins, que la première de ces deux visions alternatives de la nature des propositions protocolaires était associée à une forme de « positivisme atomiste » (« *atomistischer Positivismus* »), semblable à celle qu'avait défendue Ernst Mach (1886), que l'on pouvait estimer avoir été dépassée – notamment à la lumière des objections que les psychologues de la *Gestalt* avaient soulevées à son encontre –, alors que la seconde était « rarement défendue » (« *nicht häufig vertreten* »), bien qu'elle méritât un examen plus attentif (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 330).

telles que P comme relevant d'un sous-langage particulier du langage de la physique, puisqu'elles sont déductibles d'un ensemble de propositions singulières qui appartiennent à ce dernier, en conjonction avec une certaine description des conditions locales pertinentes ou avec une certaine loi de la nature. Ces deux propositions sont l'une le synonyme de l'autre, car il est toujours possible de déduire « P » de « p », et inversement. Par conséquent, si l'on comprend que les expressions métalinguistiques « P et p décrivent le même état de choses » (« *P und p beschreiben denselben Sachverhalt* ») et « p est déductible de P et inversement » (« *aus P ist p ableitbar und umgekehrt* ») sont, elles aussi, synonymes, en ceci qu'elles correspondent à deux formulations alternatives – respectivement, dans un mode de discours contentuel et dans un mode de discours formel – du même contenu conceptuel⁶⁵, l'on peut donc en conclure qu'il serait possible d'exprimer le contenu du vécu individuel de chaque sujet S dans un sous-langage particulier du langage de la physique. Autrement dit, pour tout sujet particulier S , toutes les propositions de son langage protocolaire seraient traduisibles en propositions physiques qui décrivent « l'état corporel de S » (« *Körperzustand des S* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 353), si bien qu'il serait possible d'établir une relation de correspondance biunivoque entre chacun de ces langages protocolaires particuliers et un sous-ensemble des énoncés dont se constitue le langage-système de la physique, en tant que science naturelle.

En conséquence, comme en concluait Carnap (1932b) lui-même, « du fait qu'on a établi l'isomorphisme, la langue protocolaire est transformée en une sous-langue de la langue de la physique » (« *durch die Feststellung der Isomorphie ist die Protokollsprache zu einer Teilsprache der physikalischen Sprache geworden* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 354), et plus précisément dans la sous-langue qui ne correspond pas au langage technique des physiciens, en tant que scientifiques, mais au langage dont nous nous servons, dans la vie de tous les jours, pour parler

⁶⁵ La manière dont Carnap (1932b) justifie ici l'équivalence sémantique entre les énoncés p et P rappelle, ainsi, une remarque que l'on peut lire dans son article sur « le dépassement de la métaphysique par l'analyse logique du langage » (« *Überwindung der Metaphysik durch logische Analyse der Sprache* ») (Carnap 1932a) : « Soit a un mot quelconque et $E(a)$ l'énoncé élémentaire [*Elementarsatz*] dans lequel il figure. La condition nécessaire et suffisante [*die hinreichende und notwendige Bedingung*] pour que a ait une signification peut s'énoncer dans chacune des formules suivantes, qui disent au fond la même chose [*die im Grunde dasselbe besagen*] : 1. Les critères empiriques [*die empirischen Kennzeichen*] de a sont connus. 2. Il est établi de quels énoncés protocolaires $E(a)$ est déductible [*abgeleitet werden kann*]. 3. Les conditions de vérité [*die Wahrheitsbedingungen*] de $E(a)$ sont établies. 4. La procédure de vérification [*der Weg zur Verifikation*] de $E(a)$ est connue » (Carnap 1932a ; Soulez 2010, p. 153). C'est précisément à partir de tels présupposés que l'on peut affirmer que les énoncés « p » et « P » expriment le même contenu phénoménique parce qu'il est possible de les déduire des mêmes prémisses, c'est-à-dire de les déduire l'un de l'autre, et donc parce qu'ils sont syntaxiquement (ou méta-logiquement) équivalents.

des objets physiques qui nous entourent. Il s'ensuit que le langage de la physique, en ceci qu'il contient un tel langage des objets quotidiens, serait le seul langage d'objets dans lequel il soit possible d'exprimer les contenus phénoméniques des vécus individuels de tous les sujets particuliers, *S*, en ceci qu'il permettrait d'établir une « relation déductive » (« *Ableitungszusammenhang* ») entre des propositions qui appartiennent à différents langages protocolaires individuels et une proposition physique, « *P* », que l'on peut considérer comme étant valide, c'est-à-dire compréhensible et vérifiable, pour tous les individus en question. C'est précisément pour une telle raison qu'il serait possible de regarder le langage de la physique comme étant le seul langage d'objets véritablement intersubjectif, c'est-à-dire, au vu de la définition de la science que donne Carnap (1932b) dans ce même article, comme étant le véritable langage universel de la science en tant que telle⁶⁶. Cette conclusion implique, néanmoins, le présupposé qu'il existerait une multiplicité de langages protocolaires qui seraient à même de décrire les structures des expériences d'autant d'individus distincts. C'est précisément un tel présupposé qui a suscité, au début des années 1930, un vif débat parmi les membres du Cercle de Vienne eux-mêmes, dont l'objet était précisément la nature des propositions protocolaires, et donc le rapport qui est supposé relier le langage des sciences à l'expérience empirique (Coffa 1991 ; Uebel 1992, 1993, 1996 ; Oberdan 1993, 1996). Plus précisément, un tel débat a fini par engendrer, au sein du Cercle, une division en deux camps. D'une part, il y avait les « fondationnalistes » (« *foundationalists* »), comme Moritz Schlick, Friedrich Waismann et Edgar Zilsel, qui défendaient la thèse de l'existence de propositions protocolaires relevant de langages phénoménaux qui seraient distincts du langage des sciences lui-même, quoique partiellement isomorphes à ce dernier. De ce point de vue, la fonction de ces propositions consisterait, ainsi, à servir d'« énoncés justifiés de manière non inférentielle » (« *noninferentially warranted statements* »), c'est-à-dire d'énoncés qu'il faudrait accepter en vertu de leur correspondance aux faits

⁶⁶ Tout en étant étroitement liées, l'intersubjectivité et l'universalité du langage de la physique constituent, néanmoins, deux propriétés distinctes, comme l'explique François Schmitz (2009) : le langage de la physique est un langage-système intersubjectif en ceci que l'on peut en déduire des énoncés protocolaires qui relèvent des langages protocolaires de différents sujets, alors qu'il est universel dans la mesure où « l'on peut traduire en lui tous les énoncés des autres langages (de la science) » (Schmitz 2009, p. 373), si bien qu'il peut tenir lieu de *lingua franca* pour la reconstruction rationnelle du savoir scientifique. Dans le cas du langage de la physique, le lien entre ces deux propriétés consiste en ceci que la raison pour laquelle il est possible de traduire les énoncés qui sont formulés dans les autres langages de la science en énoncés du langage-système de la physique est que tout énoncé scientifique doit porter, en dernière instance, sur des objets de la vie quotidienne, c'est-à-dire qu'il doit porter sur des objets dont on peut affirmer non seulement que leurs propriétés ne s'expriment qu'au moyen d'une certaine partie du langage de la physique, mais également que ces mêmes propriétés s'expriment précisément au moyen de cette partie du langage de la physique qui en fait un langage-système intersubjectif, puisqu'elle est corrélée aux langages protocolaires de différents sujets.

tels que nous pouvons les percevoir au moyen de nos sens, et qui apporteraient, par le biais de « relations inférentielles » (« *inferential relations* »), une justification et une signification empirique aux énoncés du langage-système de la science (Oberdan 1996, p. 269). D'autre part, il y avait les « physicalistes » (« *physicalists* »), tels Otto Neurath, Carl G. Hempel et, après le revirement auquel l'avait conduit la discussion critique qu'il avait engagée, justement, avec Neurath (1932), Carnap (1932c) lui-même, qui récusait l'idée qu'il existerait une classe d'énoncés dont on pourrait accepter la validité *prima facie*, en vertu de leur correspondance directe aux faits, et qui considéraient, par conséquent, que les fondements mêmes du système des énoncés de la science unitaire devaient être tenus pour conventionnels. Loin de pouvoir être empiriquement confirmés une fois pour toute, de tels fondements feraient partie intégrante de ce même système et seraient donc, eux aussi, susceptibles de falsification par des observations ou des expériences (Oberdan 1996, p. 269), si bien que la différence entre les énoncés les plus abstraits et ceux qui ont l'apparence d'être de simples descriptions de quelques données empiriques fondamentales ne serait pas une différence de nature, mais tout simplement une différence de degré. Dans une telle perspective, les énoncés que Carnap (1932b) qualifiait, en 1932, de « propositions protocolaires » devraient être remplacés par des énoncés qui relèvent directement du langage-système de la science, au lieu d'y être tout simplement corrélés par une quelque forme d'isomorphisme linguistique, ce qui soulève, néanmoins, la question suivante : si les énoncés qui fondent un tel langage-système sont, eux aussi, de nature conventionnelle, de telle sorte qu'il n'est plus possible de les regarder comme étant des descriptions directes des phénomènes, en quoi pourrait-on en déterminer la valeur de vérité ?

Cette question nous amène, ainsi, à nous intéresser à la manière dont Carnap (1936b, 1937, 1945a) a développé ultérieurement la conception du savoir scientifique, en tant que corps de connaissances, non pas comme système conceptuel, mais comme langage-système, et notamment comme système des propositions intersubjectivement valides, qu'il avait déjà énoncée en 1932. Dans deux articles, intitulés, respectivement, « *Testabilité et signification* » (« *Testability and Meaning* ») (Carnap 1936b, 1937) et « *Sur la logique inductive* » (« *On Inductive Logic* ») (Carnap 1945a), ce dernier affronte, en effet, le problème de savoir en quoi l'on pourrait envisager les modalités de confirmation (« *confirmation* ») des énoncés dont se constitue un tel système lorsqu'on adopte une perspective non fondationnaliste, et donc lorsque l'on considère que « tout énoncé (synthétique) serait une hypothèse, c'est-à-dire lorsqu'on considère qu'il ne saurait jamais être vérifié de manière complète et définitive » (« *every (synthetic) sentence is a hypothesis, i.e. can never be verified completely and definitively* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 69). Pour ce faire, il revient de manière critique sur la théorie vérificationniste de la signification, en la mettant en relation avec le problème de la justification du principe d'induction, ce qui lui permet de remplacer le critère « plus ancien » (« *older* ») de la

vérification – c’est-à-dire le critère qu’avaient retenu Wittgenstein (1922) et les fondateurs du Cercle de Vienne⁶⁷ – par celui de la confirmation graduelle⁶⁸, dont il vise à fournir une définition quantitative et logiquement rigoureuse. Dans les deux cas, Carnap (1936b, 1937, 1945a) s’attelle, en effet, à reconstruire rationnellement « deux corps de croyances généralement acceptés mais plus ou moins vagues » (« *a body of generally accepted but more or less vague beliefs* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 101), dont on peut affirmer qu’ils tiennent précisément aux rapports entre le langage de la science et l’expérience, et qui sont étroitement associés l’un à l’autre. Le premier consiste en ce que Carnap (1936b, 1937) lui-même appelait « le principe de l’empirisme », c’est-à-dire dans la thèse que « toute connaissance est empirique » (« *all knowledge is empirical* »), ou que « tous les énoncés synthétiques que nous pouvons connaître sont fondés sur (ou liés à) des expériences » (« *all synthetic sentences that we can know are based on (or connected with) experience* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 145), alors que le second consiste dans le principe d’induction, c’est-à-dire dans le principe d’après lequel, tel que le décrivait Popper (1979), nous pouvons dériver « certaines régularités (lois de la nature, théories) » (« *certain regularities (laws of nature, theories)* ») de « l’observation répétée » (« *repeated observation* ») de faits singuliers : « si nous croyons que le soleil se lèvera demain, c’est parce qu’il en a été ainsi dans le passé » (Popper 1979 ; 1998, p. 42). Autrement dit, dans les articles que nous sommes en train d’analyser, Carnap (1936b, 1937, 1945a) vise à reformuler ces deux thèses d’une manière qui soit non pas naïvement métaphysique, mais scientifique et méthodologique, en

⁶⁷ « L’exigence de vérifiabilité [*‘requirement of verifiability’*] a été énoncée pour la première fois par Wittgenstein [(1922)] ; sa signification et ses conséquences [*‘meaning and consequences’*] furent exposées dans les premières publications de notre *Cercle de Vienne*, et elle est toujours soutenue par l’aile la plus conservatrice de ce Cercle [à savoir, par exemple, Moritz Schlick (1931, 1936) et Friedrich Waismann (1930)]. Cette thèse demande à la fois d’être expliquée et modifiée [*‘both explanation and modification’*]. Il faut dire plus clairement ce que l’on entend par ‘vérifiabilité’. Et la thèse doit ensuite être modifiée et transformée dans une certaine direction » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 63).

⁶⁸ « Si par vérification [*‘verification’*] on entend le fait d’établir la vérité de manière complète et définitive [*‘understood as a complete and definitive establishment of truth’*], alors un énoncé universel [*‘universal statement’*], par exemple ce qu’on appelle une loi de la physique ou de la biologie, ne peut jamais être vérifié, comme cela a souvent été remarqué. Même si l’on supposait que chaque cas d’application de la loi [*‘each single instance of the law’*] était vérifiable, le nombre de cas d’application auxquels la loi fait référence – par exemple les points de l’espace-temps – est infini et ne peut donc jamais être épuisé par nos observations qui sont toujours en nombre fini. Nous ne pouvons pas vérifier la loi, mais nous pouvons la tester en testant chacun de ses cas d’application [*‘We cannot verify the law, but we can test it by testing its single instances’*], c’est-à-dire les énoncés particuliers que nous dérivons de la loi et d’autres énoncés établis auparavant. Si, en poursuivant la série de telles expériences de test [*‘the continued series of such testing experiments’*], on ne trouve aucun cas négatif et que le nombre de cas positifs augmente, alors notre confiance [*‘confidence’*] dans la loi croîtra progressivement. Ainsi, au lieu de vérification, nous pouvons parler ici de *confirmation* graduellement croissante [*‘gradually increasing confirmation’*] de la loi » (Carnap 1936b ; 1937 ; 2015a, p. 66).

identifiant, dans le cas du principe de l'empirisme, un critère de confirmation empirique qui puisse également servir de critère de signification – en accord avec la théorie vérificationniste de la signification, à condition qu'on la reformule comme nous l'avons vu plus haut, c'est-à-dire en remplaçant l'exigence de vérifiabilité par une exigence de confirmation progressive – ainsi que, dans le cas du principe d'induction, un critère permettant de déterminer le degré auquel telle ou telle observation empirique permet de confirmer telle ou telle régularité dont on peut faire l'hypothèse. Mais qu'est-ce que ces deux critères ont-ils donc en commun et en quoi permettent-ils d'éclairer les rapports entre langage scientifique et expérience ? Dans les deux cas, il s'agit d'identifier la valeur de vérité d'un énoncé donné, et donc d'en déterminer la signification, en définissant des exigences que doit satisfaire ce dernier, en vertu de sa forme logique particulière, et qui se traduisent par des règles linguistiques permettant de le ramener à des énoncés ayant une forme logique différente. Ce faisant, c'est-à-dire en posant le problème de la reconstruction du principe de l'empirisme et du principe d'induction dans ces termes, Carnap (1936b, 1937, 1945) prolonge la démarche syntaxique – c'est-à-dire logico-analytique plutôt qu'ontologico-épistémologique – que nous avons décrite dans la section précédente. Plus précisément, bien que la problématique qu'il affronte dans *Testabilité et signification* et dans *Sur la logique inductive* soit de nature sémantique – en ceci qu'elle concerne, justement, la détermination de la validité empirique d'un certain ensemble d'énoncés, et donc, d'après la théorie vérificationniste de la signification, y compris dans sa version expliquée et modifiée, la détermination de leur signification – Carnap (1936b, 1937, 1945a) continue, néanmoins, d'adopter une approche syntaxique, en ceci qu'il ne tâche pas de définir des règles métalinguistiques qui permettraient d'interpréter tel ou tel énoncé du langage objet en question, en déterminant le domaine d' « états de choses » (« *states of affairs* ») extralinguistiques, pour reprendre la terminologie de Wittgenstein (1922), auquel il renvoie et en lui attribuant, par ce même biais, une certaine valeur de vérité. Comme l'observe Pierre Wagner (2009), en effet, le « tournant sémantique » (« *semantical turn* ») que Carnap (1939, 1942, 1947) a emprunté entre la fin des années 1930 et le début des années 1940 s'est traduit moins par l'abandon d'une approche syntaxique au profit d'une approche intégralement « sémantique » (« *semantical approach* »), que par l'ajout d'un système de règles sémantiques au cadre syntaxique qu'il avait déjà établi pour analyser la forme logique de tel ou tel langage formalisé (Wagner 2009, p. 28), c'est-à-dire par une expansion de l'approche syntaxique qu'il avait précédemment développée. Il en découle que, aussi bien dans *Testabilité et signification* que dans *Sur la logique inductive*, Carnap (1936b, 1937, 1945a) suit une démarche que l'on peut qualifier, tout de même, de « syntaxique au sens large », ou de « formelle ».

Par conséquent, c'est précisément sur la base de ces présupposés que nous pouvons interpréter l'approche qu'adopte Carnap (1936b, 1937, 1945a) dans ces deux ouvrages comme consistant dans

une reconstruction syntaxique, au sens large du terme, du principe d'induction et du principe de l'empirisme, qui se structure en deux étapes. Mais que comportent, plus précisément, ces deux étapes ? En quoi s'articulent-elles l'une à l'autre ? Quelles conclusions permettent-elles de tirer au sujet de la question, plus générale, de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, ainsi que de la vision de la science comme corps de connaissances qu'a fini par développer Carnap (1936b, 1937, 1945a) ? Afin de répondre à ces autres questions, dans un premier temps (section 1.3.1), nous verrons en quoi, dans *Testabilité et signification*, Carnap (1936b, 1937) reformule le principe de l'empirisme, en tant que critère de signification empirique, de manière formelle et structurelle, c'est-à-dire en le traduisant dans une exigence de nature syntaxique – en ceci qu'elle porte, précisément, sur la forme logique de certains énoncés et sur les règles par le biais desquelles ces derniers peuvent être dérivés d'autres énoncés, d'une forme différente – que devraient respecter tous les énoncés qui sont formulés dans le cadre d'un certain langage formel *L* afin qu'on puisse considérer ce dernier comme étant un « langage empiriste » (« *empiricist language* ») – et donc comme étant un langage dont la structure syntaxique et les présupposés (pragmatiques) qui en déterminent les conditions d'application soient, eux-mêmes, tels que l'on ne puisse pas s'en servir pour formuler des énoncés synthétiques qui n'aient aucun lien avec l'observation empirique, et qui soient, ainsi, dépourvus de signification (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 145) – et « physicaliste » (« *physicalistic* ») – et donc comme étant un langage dont les termes descriptifs sont testables ou confirmables sur la base de « prédicats de choses observables » (« *observable thing-predicates* »), c'est-à-dire de prédicats qui attribuent des propriétés ou des relations à des objets physiques, plutôt que sur la base de « prédicats psychologiques observables » (« *observable psychological predicates* »), c'est-à-dire de prédicats qui attribuent des états psychologiques ou des relations perceptives avec le monde extérieur à un sujet donné (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 110-111). Néanmoins, comme Carnap (1936b, 1937) supposait qu'un tel lien ne pouvait pas consister dans une relation de correspondance directe et qu'aucun énoncé ne saurait être confirmé, une fois pour toute, par n'importe quelle quantité d'informations empiriques, la détermination d'un tel critère soulève la question de savoir en quoi l'on pourrait quantifier la mesure dans laquelle tel ou tel énoncé qui décrit une observation empirique donnée contribue à augmenter le degré de confirmation d'un énoncé synthétique plus abstrait. C'est précisément pour une telle raison que, dans un second moment (section 1.3.2), nous verrons également en quoi, dans *Sur la logique inductive*, Carnap (1945a) propose une reconstruction de la notion vague de probabilité, telle que l'entend le sens commun, qui s'articule en deux concepts. Plus précisément, il distingue ce qu'il appelle « probabilité₁ » (« *probability₁* »), c'est-à-dire une définition du concept de probabilité comme étant « un concept logique, une certaine relation logique...entre deux propositions... » (« *a logical concept, a certain logical relation between two...propositions* »), et donc comme étant « le

même que le concept de degré de confirmation » (« *the same as the concept of degree of confirmation* »), de ce qu'il appelle « probabilité₂ » (« *probability₂* »), c'est-à-dire une définition du concept de probabilité comme étant « un concept empirique » (« *an empirical concept* »), et donc comme étant « la fréquence relative sur le long terme d'une propriété relativement à une autre » (« *the relative frequency in the long run of one property with respect to another* ») (Carnap 1945a ; 2015, p. 71)⁶⁹. Cette reconstruction, à deux volets, de la notion de probabilité lui permet, ainsi, de formuler un certain nombre de règles qui s'appliquent aux énoncés d'un langage formel donné, semblable au langage empiriste et physicaliste *L* dont il est question dans *Testabilité et signification*. Nous verrons, par conséquent, en quoi Carnap (1945a) se sert de ces mêmes règles afin de reconstruire formellement le principe d'induction en tant qu'exigence syntaxique que doit satisfaire, précisément, un langage de ce type. Cela nous amènera à en conclure, par la suite, que l'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique et de la théorie de la connaissance dont nous avons parlé dans la section précédente a fini par aboutir à une conception de la science, en tant que corps de connaissances, comme cadre linguistique, dont il est également possible de se servir pour caractériser la conception classique des théories scientifiques.

1.3.1 La reconstruction rationnelle du principe de l'empirisme et le concept de degré de confirmation comme critère de signification empirique pour les hypothèses incomplètement confirmables

La première étape de la démarche que suit Carnap (1936b, 1937) dans ces deux ouvrages consiste, en conséquence, à déterminer un critère de signification empirique pour les énoncés synthétiques en tant qu'énoncés qui contiennent des « prédicats descriptifs » (« *descriptive predicates* ») – que

⁶⁹ Comme le remarque Carnap (1945b) lui-même, « l'histoire de la théorie des probabilités est l'histoire des tentatives pour trouver une explication du concept préscientifique de probabilité [*the history of attempts to find an explication for the pre-scientific concept of probability*] ... Ce qui suit est une classification simple et plausible des diverses conceptions de la probabilité en trois groupes : (i) la conception classique [*classical conception*], dont l'origine se trouve chez Jacob Bernoulli et Laplace, et qui est représentée chez leurs successeurs sous diverses formes ; ici, la probabilité est définie comme le ratio du nombre de cas favorables sur le nombre de tous les cas possibles [*probability is defined as the ratio of the number of favorable cases to the number of all possible cases*] ; (ii) la conception de la probabilité comme une certaine relation logique objective entre des propositions (ou des phrases) [*the conception of probability as a certain objective logical relation between propositions (or sentences)*] ; les principaux représentants de cette conception sont Keynes [1921] et Jeffreys [1939] ; (iii) la conception de la probabilité comme fréquence relative [*the conception of probability as relative frequency*], développée le plus complètement par von Mises [1928] et Reichenbach [1935] » (Carnap 1945b ; 2015b, p. 51-52).

Carnap (1936b, 1937) définissait comme étant des prédicats qui dénotent, justement, des « concepts descriptifs » (« *descriptive concepts* »), et donc des concepts « non-logiques » (« *non-logical* ») qui relèvent du domaine des sciences empiriques (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 73) – sous la forme d’un ensemble de règles de transformation qui sont, pour ainsi dire, « encastrées » dans la syntaxe même du langage empiriste et physicaliste que l’on est en train de construire, et qui permettent d’introduire, au sein de ce même langage, tous les prédicats descriptifs qu’il n’est pas nécessaire de considérer comme étant « primitifs » (« *primitive* ») – c’est-à-dire comme étant des prédicats que l’on peut introduire directement – en les déduisant d’autres prédicats, déjà définis. Pour ce faire, dans *Testabilité et signification*, Carnap (1936b, 1937) analyse quatre critères dont on pourrait se servir pour déterminer les liens qu’un certain énoncé synthétique entretient avec l’expérience empirique, et qui sont, en allant du plus strict au plus lâche, la « testabilité complète » (« *complete testability* »), la « confirmabilité complète » (« *complete confirmability* »), la « testabilité » simple (« *testability* »), complète ou incomplète, et la « confirmabilité » simple (« *confirmability* »), complète ou incomplète (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 146-147). Carnap (1936b, 1937) distingue ici, notamment, deux niveaux d’analyse, à savoir celui de l’analyse logique de ces quatre critères, en tant que règles syntaxiques permettant d’introduire des prédicats descriptifs non primitifs au sein d’un langage empiriste et physicaliste donné, et celui de l’analyse empirique de la signification des concepts de « confirmable » (« *confirmable* ») et de « testable » (« *testable* ») en tant que termes descriptifs que l’on pourrait qualifier de « métalinguistiques », qui ne relève, cependant, pas de l’analyse de la syntaxe logique du langage. Une telle analyse appartient, en effet, « au champ de la biologie et de la psychologie, à savoir à la théorie de l’usage du langage comme genre spécifique d’activité humaine [*‘the theory of the use of language as a special kind of human activity’*] », et donc au domaine de la pragmatique (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 73). C’est pourquoi, comme l’observe encore une fois Pierre Wagner (Carnap 2015a), Carnap (1936b, 1937) se limite à les définir de manière informelle, sur la base des concepts de « prédicat observable » (« *observable predicate* ») et de « prédicat réalisable » (« *realizable predicate* »), conçus en tant que prédicats de choses et non pas en tant que prédicats psychologiques, sans chercher à pousser son analyse dans la direction d’une « caractérisation de ces deux termes par une théorie behavioriste du langage » (« *behavioristic theory of language* ») (Carnap 2015a, p. 26).

Plus précisément, toujours dans *Testabilité et signification*, Carnap (1936b, 1937) définit un prédicat, « *P* », d’un langage formel, *L*, comme étant un « prédicat observable »

pour un organisme N (par exemple une personne) si, pour des arguments adéquats [*‘for suitable arguments’*]⁷⁰, par exemple ‘ b ’, N est capable dans des circonstances adéquates d’arriver à une décision, à l’aide d’un petit nombre d’observations, [*‘under suitable circumstances to come to a decision with the help of few observations’*] au sujet d’un énoncé complet [*‘a full sentence’*], par exemple ‘ $P(b)$ ’, c’est-à-dire d’arriver à une confirmation [*‘a confirmation’*] soit de ‘ $P(b)$ ’, soit de ‘ $\sim P(b)$ ’ [c’est-à-dire la négation de ‘ $P(b)$ ’], d’un degré si élevé que soit il acceptera ‘ $P(b)$ ’, soit il le rejettera (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 98).

Symétriquement, il définit un prédicat, « P », de ce même langage comme étant un « prédicat réalisable » par un organisme N « si, pour un argument adéquat, par exemple ‘ b ’, N est capable, dans des circonstances adéquates, de rendre vrai [*‘to make...true’*] l’énoncé complet ‘ $P(b)$ ’, c’est-à-dire

⁷⁰ Plus précisément, un argument peut être considéré comme « adéquat » pour un prédicat donné si l’application du second au premier permet de former un énoncé qui est syntaxiquement correct, d’après les règles de formation du langage formel que l’on est en train d’utiliser. Par exemple, en faisant un parallèle entre la syntaxe logique des langages formels et la syntaxe des langages naturels, le mot « et » ne constitue pas un argument pertinent pour le prédicat « être un nombre premier », car l’énoncé « et est un nombre premier » ne respecte pas les règles de la syntaxe grammaticale du français en tant que langage naturel, d’après lesquelles une conjonction telle que le mot « et » ne peut en aucun cas tenir lieu de sujet. Pour plus de précisions à ce sujet, voir Carnap (1932a). Le problème de l’adéquation d’un certain sujet à un prédicat donné permet, d’ailleurs, à Carnap (1932a) de mettre au clair l’une des distinctions fondamentales que l’on peut faire entre la syntaxe grammaticale d’un langage naturel et la syntaxe logique d’un langage formel. Par exemple, si l’on considère l’énoncé « César est un nombre premier » (« *Caesar ist eine Primzahl* ») (Carnap 1932a ; Soulez 2010, p. 157), l’on peut s’apercevoir que ce dernier est parfaitement conforme aux règles de la syntaxe grammaticale du français en tant que langage naturel, alors qu’il est tout de même dépourvu de sens d’un point de vue purement logique, en ceci qu’un nom propre de personne ne saurait être subsumé sous le concept de nombre premier. C’est pourquoi, toujours dans son article sur le dépassement de la métaphysique, Carnap (1932a) remarque qu’une véritable syntaxe logique, c’est-à-dire un système de règles syntaxique qui serait à même de restituer non seulement les rapports grammaticaux entre les mots d’un langage donné, mais également leurs rapports logiques, ne se limiterait pas tout simplement à distinguer des « espèces de mots (substantifs, adjectifs, verbes, conjonctions, etc.) » (« *nur die Wortarten der Substantive, der Adjektive, der Verben, der Konjunktionen usw. unterscheiden* ») (Carnap 1932a ; Soulez 2010, p. 157). Au contraire, elle opérerait également « à l’intérieur de ces espèces certaines distinctions exigées par la logique » (« *innerhalb dieser Arten noch gewisse logisch geforderte Unterschiede machen* ») afin que, dans le langage en question, il ne soit possible de former « aucun *simili*-énoncé » (« *keine Scheinsätze gebildet werden* »), c’est-à-dire aucun énoncé qui soit dépourvu de sens (Carnap 1932a ; Soulez 2010, p. 157). De telles distinctions sont, par exemple, la distinction des substantifs en « plusieurs espèces de mots [*‘mehrere Wortarten’*] selon qu’ils désignent des propriétés des corps, des propriétés des nombres, etc. », si bien que, du point de vue d’une syntaxe logique de la langue française, « les mots ‘général’ [*‘Feldherr’*] et ‘nombre premier’ [*‘Primzahl’*] appartiendraient à des espèces grammaticalement différentes [*‘zu grammatisch verschiedenen Wortarten gehören’*] », et l’énoncé « César est un nombre premier » serait donc tout aussi syntaxiquement incorrect que l’énoncé « et est un nombre premier » (« *und ist eine Primzahl* ») (Carnap 1932a ; Soulez 2010, p. 157).

de produire la propriété P au point b [*‘to produce the property P at the point b ’*] » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 99). Il s’ensuit que ces deux types de prédicats sont définis « relativement aux personnes qui utilisent le langage L auquel appartient le prédicat en question » (« *with respect to the people who use the language L to which the predicate in question belongs* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 99), c’est-à-dire de manière conventionnelle et pragmatique, et non pas relativement à quelques « faits ultimes » (« *ultimate facts* ») de l’expérience (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 89-90)⁷¹. En tant que tels, ils n’appartiennent à aucun langage protocolaire – toujours au sens de Carnap (1932b) –, mais directement à ce même « langage que nous utilisons dans la vie courante lorsque nous parlons des choses perceptibles qui nous entourent » (« *language which we use in every-day life in speaking about the perceptible things surrounding us* ») que nous avons évoqué plus haut et que Carnap (1936b, 1937) appelle, dans *Testabilité et signification*, le « langage des choses » (« *thing-language* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 109). Encore une fois, Carnap (1936b, 1937) précisait également qu’un tel langage ne constitue qu’une partie du langage dont se servent les physiciens en tant que scientifiques, c’est-à-dire le « langage de la physique » (« *physical language* »), qui contient, justement, « le langage des choses et, en plus, ces termes de la terminologie scientifique dont nous avons besoin pour une description scientifique des processus de la nature inorganique [*‘those terms of a scientific terminology which we need for a scientific description of the processes in inorganic nature’*] » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 109-110). Autrement dit, le langage des choses correspond au langage qui nous permet d’exprimer les propriétés qualitatives d’objets concrets, alors que la terminologie scientifique qui est caractéristique du langage de la physique en tant que tel est un langage essentiellement quantitatif, dont la fonction consiste à exprimer les résultats d’opérations de mesure. Dans *Testabilité et signification*, Carnap (1936b, 1937) considère ainsi, contrairement à

⁷¹ D’après la définition du concept de « prédicat observable » que donne ici Carnap (1936b, 1937), « le prédicat ‘rouge’ par exemple est observable pour une personne N qui perçoit normalement les couleurs [*‘possessing a normal colour sense’*]. Pour un argument adéquat, c’est-à-dire un point spatio-temporel [*‘a space-time-point’*] c suffisamment proche de N , par exemple une tache sur la table devant N , N est capable, dans des circonstances appropriées – c’est-à-dire s’il y a suffisamment de lumière en c – d’arriver à une décision au sujet de l’énoncé complet ‘la tache c est rouge’ [*‘the spot c is red’*] après un petit nombre d’observations – à savoir en regardant la table ». Au contraire, « le prédicat ‘un champ électrique est de telle ou telle intensité’ [*‘an electric field of such and such an amount’*] n’est observable pour personne [indépendamment du fait que ses facultés perceptives soient normalement constituées], parce que bien que nous sachions comment tester un énoncé complet de ce prédicat, nous ne pouvons pas le faire directement, c’est-à-dire au moyen d’un petit nombre d’observations [*‘directly, i.e. by a few observations’*]; nous devons avoir recours à certains instruments et donc réaliser un grand nombre d’observations préliminaires [*‘a great many preliminary observations’*] afin de découvrir si les choses devant nous sont des instruments du type requis [*‘instruments of the kind required’*] » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 98-99).

ce qu'il avait maintenu en 1932, que la « base pour le langage de la science tout entier » (« *basis of the whole language of science* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 110) consisterait non pas en une multiplicité de langages protocolaires qui serviraient à retranscrire des expériences individuelles pour les rendre intersubjectivement compréhensibles et communicables – « que ce soit dans le langage phénoménaliste des états de conscience ou dans le langage physicaliste de la description corporelle » (Bouveresse 2011, p. 157) –, mais précisément dans cette partie du langage scientifique de la physique qu'est le langage des choses, en ceci qu'il contient des prédicats observables et réalisables, si bien que la distinction entre le langage de la science, en général, et sa base empirique serait, en dernière instance, de nature purement pragmatique. Il en découle que, selon la conception du langage de la science que défend Carnap (1936b, 1937) dans *Testabilité et signification*, la signification des termes qui sont censés décrire les faits observables ne dépend pas de l'observation en tant que telle, mais de la manière dont les différents observateurs se servent de ce même langage pour formuler les résultats d'une telle activité⁷².

C'est précisément pour une telle raison que, d'un point de vue purement logique et formel, ce que partagent les quatre critères de confirmation qu'analyse Carnap (1936b, 1937), dans *Testabilité et signification*, consiste en ceci qu'ils expriment l'exigence d'identifier et d'éclaircir les liens qui existent entre l'expérience d'un sujet donné et tout énoncé synthétique dont on veut déterminer la signification empirique en formulant, justement, des « règles de transformation » (« *transformative rules* ») de nature spécifique. Plus précisément, comme l'explique Carnap (1936b, 1937) lui-même, les règles de transformation dont il parle ne sont rien d'autre que des règles « qui disent comment déduire [*how to deduce*] un énoncé d'une classe d'énoncés, appelés prémisses [*the so-called premisses*], et quels énoncés doivent être pris comme étant vrais de manière inconditionnelle [*to be taken as true unconditionally*], c'est-à-dire sans qu'il soit fait référence à des prémisses » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 74). Il faut, en effet, que de telles règles permettent de « réduire » (« *reduce* »)⁷³ l'énoncé en question à d'autres énoncés, ou bien qu'elles permettent de le « définir »

⁷² Ce faisant, Carnap (1936b, 1937) a donc fini par adopter ce que l'on pourrait appeler, en suivant Paul Feyerabend (1962), une « *théorie pragmatique de l'observation* » (« *pragmatic theory of observation* »), c'est-à-dire l'idée d'après laquelle « le fait qu'une proposition appartienne au domaine observationnel n'a pas d'incidence sur sa signification » (« *the fact that a statement belongs to the observational domain has no bearing upon its meaning* ») (Feyerabend 1962 ; Bouveresse 2011, p. 158), bien qu'il ait toujours continué de présupposer, comme le remarque Jacques Bouveresse (2011), que la partie observationnelle du langage de la science, c'est-à-dire le langage des choses, serait sémantiquement stable, en ceci qu'elle ne serait pas touchée par le changement des théories dont elle constituerait, justement, la base empirique.

⁷³ Un exemple d'énoncé de réduction, plus précisément d'« énoncé de réduction bilatéral » (« *bilateral reduction sentence* »), est fourni par la formule logique par le biais de laquelle Carnap (1936b, 1937) essaie de montrer comment il serait possible de donner une signification empirique à un terme qui dénote une propriété dispositionnelle, et donc non

(« *define* »)⁷⁴ par rapport à ces derniers (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 81). De plus, il faut également que ces autres énoncés aient, eux aussi, comme nous l’avons anticipé plus haut, une forme logique particulière. Il s’agit, en effet, d’énoncés que Carnap (1936b, 1937) qualifiait d’énoncés de « forme atomique » (« *atomic form* »), et qu’il définissait, pourtant, non pas comme étant des énoncés qui seraient directement liés, encore une fois, à des faits ultimes de l’expérience, mais comme des énoncés dont la forme logique particulière dépend uniquement du langage formel dans lequel ils sont formulés, puisqu’ils sont introduits dans ce même langage de manière purement récursive, à partir des concepts de « chaîne introductive de forme atomique » (« *introductive chain of atomic form* ») et de « prédicat atomique » (« *atomic predicate* ») – qu’il faudrait considérer comme étant eux-mêmes des termes métalinguistiquement primitifs⁷⁵ – et puisqu’ils ne contiennent que des prédicats qui sont

observable de manière simple et directe, telle que la solubilité. Plus précisément, cette formule s’écrit $(x)(t) [Q_1(x, t) \supset (Q_3(x) \equiv Q_2(x, t))]$, ou, traduite dans un formalisme plus moderne, $\forall x, \forall t [Q_1(x, t) \rightarrow (Q_3(x) \equiv Q_2(x, t))]$. Sa signification est donc exprimée par l’énoncé « Si une chose quelconque x est placée dans l’eau à un temps t quelconque, alors, si x est soluble dans l’eau, x se dissout au temps t , et, si x n’est pas soluble dans l’eau, x ne se dissout pas », à condition que l’on interprète le prédicat « $Q_1(x, t)$ » comme signifiant « la chose x est placée dans l’eau à un certain temps t », le prédicat « $Q_2(x, t)$ » comme signifiant « la chose x se dissout dans l’eau à un certain temps t » et le prédicat « $Q_3(x)$ » comme signifiant « la chose x est soluble dans l’eau » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 82).

⁷⁴ « Par définition (explicite) d’un prédicat descriptif [*an (explicit) definition of a descriptive predicate*] ‘ Q ’ à un argument, nous entendons un énoncé de la forme

$$(D :) \quad Q(x) \equiv \dots x \dots$$

où la place de ‘ $\dots x \dots$ ’ se trouve une fonction propositionnelle [*propositional function*] – appelé le *definiens* – qui contient ‘ x ’ comme seule variable libre [*only free variable*]. S’il y a plusieurs arguments, la forme est analogue. Nous dirons qu’une définition D est fondée sur la classe C de prédicats si tout symbole descriptif [*descriptive symbol*] qui a une occurrence dans le *definiens* de D appartient à C . Si les prédicats d’une classe C sont disponibles dans notre langage, nous pouvons introduire d’autres prédicats par une chaîne de définitions [*by a chain of definitions*] d’un genre tel que chaque définition est fondée sur C et sur les prédicats définis par des définitions précédentes de la chaîne » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 81). L’on peut aisément remarquer en quoi les règles de définition posent des conditions plus strictes que celles que posent les règles de réduction (bilatérale ou non) en ceci que, dans le premier cas, il ne s’agit pas d’établir un lien d’implication logique entre énoncés, mais une relation d’équivalence logique, ce qui signifie attribuer à l’énoncé ou au prédicat que l’on est en train de définir une signification complète et définitive, et non pas incomplète et relative à telle ou telle condition.

⁷⁵ « *Définition 14. a. Une chaîne introductive* [c’est-à-dire une chaîne finie d’ensembles finis d’énoncés à des prédicats qui sert à introduire un nouveau prédicat dans le langage L par le biais de définitions ou d’énoncés de réduction] fondée sur des prédicats primitifs [c’est-à-dire des prédicats qui sont directement introduits dans le vocabulaire du langage, sans définition] d’un langage L [*an introductive chain based upon primitive predicates of a language L*] et qui est de forme atomique (ou moléculaire, ou généralisée, ou essentiellement généralisée, respectivement) est appelée chaîne introductive atomique (ou moléculaire, généralisée ou essentiellement généralisée, respectivement) de L [*an atomic...introductive chain of L*].

soit des prédicats observables, soit des prédicats réalisables. Il en découle que, comme l'écrit Carnap (1936b, 1937) lui-même, « c'est une question de convention [*'a matter of convention'*] que de savoir quels prédicats sont pris comme prédicats primitifs [*'primitive predicates'*] d'un certain langage [formel] *L* ; et donc également quels prédicats sont pris comme prédicats atomiques, et quels énoncés comme énoncés atomiques » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 88-90). Cela signifie, en outre, que, afin qu'un certain énoncé synthétique soit doué de signification, il faut que l'on puisse déduire tous les prédicats qui y figurent d'une certaine classe (voire de plusieurs classes) de prédicats observables ou réalisables, par l'intermédiaire de chaînes d'implications (et donc d'énoncés de réduction), ou d'équivalences logiques (et donc de définitions explicites), que Carnap (1936b, 1937) appelait « chaînes introductives » (« *introductive chains* »). Ces chaînes d'énoncés ne sont, en conséquence, rien d'autre que les règles de transformation, de nature purement syntaxique – en ceci qu'elles tiennent uniquement à la forme logique des énoncés qui les constituent et aux relations, elles-mêmes de nature purement formelle, que ces mêmes énoncés entretiennent les uns avec les autres –, par lesquelles se traduit, toujours selon Carnap (1936b, 1937), tout critère de signification empirique, puisqu'elles permettent de restreindre « le langage de la science » (« *the language of science* ») de telle sorte qu'on puisse le considérer comme étant véritablement empirique.

Plus précisément, en tant que règles syntaxiques, les chaînes introductives font en sorte que « les prédicats descriptifs, et donc les énoncés synthétiques [*'descriptive predicates and hence synthetic sentences'*], ne soient pas admis à moins d'avoir quelque lien avec des observations possibles [*'unless they have some connection with possible observations'*], un lien qui doit être caractérisé de manière adéquate [*'in a suitable way'*] » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 145), c'est-à-dire en identifiant, en dernière analyse, une « base de réduction suffisante » (« *sufficient reduction basis* ») ou une « base de définition suffisante » (« *sufficient definition basis* ») du langage formel *L* en question, qui puisse servir soit de « base de confirmation suffisante » (« *sufficient confirmation basis* »), soit de « base de

b. Un *prédicat* de *L* est appelé *atomique* (ou *moléculaire*) [*'a predicate of L is called atomic or (molecular) predicate'*] s'il est soit un *prédicat primitif* de *L*, soit introduit par une chaîne introductive atomique (ou moléculaire, respectivement) de *L* ; il est appelé *généralisé* (ou essentiellement généralisé) s'il est introduit par une chaîne introductive de *L* généralisée (ou essentiellement généralisée, respectivement) [*'by a generalized (or essentially generalized, respectively) introductive chain of L'*].

Définition 15. a. On dit d'un énoncé *S* qu'il est un *énoncé atomique* si *S* est un énoncé complet d'un *prédicat atomique* [*'a full sentence of an atomic predicate'*]. – b. On dit de *S* qu'il est un *énoncé moléculaire* si *S* est de forme moléculaire [*'has a molecular form'*] et ne contient que des *prédicats moléculaires*. – c. On dit de *S* qu'il est un *énoncé généralisé* si *S* contient un *opérateur* (non restreint) ou un *prédicat généralisé* [*'an (unrestricted) operator or a generalized predicate'*]. – d. On dit de *S* qu'il est un *énoncé essentiellement généralisé* si *S* est un *énoncé généralisé* et n'est pas équipollent à un *énoncé moléculaire* [*'not equipollent with a molecular sentence'*] (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 88-90).

test suffisante » (« *sufficient test basis* »), en fonction du critère de confirmation et de signification retenu (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 111). Par « base de réduction », ou « base de définition », « suffisante », Carnap (1936b, 1937) entend ici « une classe *C* de prédicats descriptifs d'un langage *L* telle que tout prédicat descriptif de *L* est réductible à [ou définissable par rapport à] *C* » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 111). Une telle classe de prédicats n'est, néanmoins, pas déterminable *a priori*, dans la mesure où la réductibilité ou la définissabilité de tout prédicat descriptif « dépend de la validité de certains énoncés universels [c'est-à-dire des énoncés qui constituent, justement, les chaînes introductives (par réduction ou par définition) des différents prédicats descriptifs qui ne sont pas directement observables ou réalisables], et donc du système des lois physiques » (« *depends upon the validity of certain universal sentences, and hence upon the system of physical laws* »), si bien que, comme en conclut Carnap (1936b, 1937) lui-même, « ce n'est qu'après avoir construit un système de la physique [*a system of physics*] que nous pourrions déterminer quelles bases sont suffisantes par rapport à ce système » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 114). En conséquence, c'est précisément dans un tel sens que, en dernière analyse, la relation qui existe entre la base empirique du système des énoncés de la physique, en tant que langage-système de la science unifiée, et l'expérience empirique dépend essentiellement de la structure logique du système lui-même. Autrement dit, comme l'écrit, encore une fois, Carnap (1936b, 1937) lui-même, il suffit que « les désignations biologiques d'activité perceptive » (« *the biological designations of perceptive activity* ») qui expriment la « relation entre les énoncés de base [du langage-système de la science unifiée] et nos perceptions » (« *connection between the basic and our perceptions* ») « apparaissent dans la formulation des exigences méthodologiques [*methodological requirements*] qui concernent les énoncés de base [*basic sentences*] » et non pas « dans les énoncés de base eux-mêmes » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 126), c'est-à-dire qu'une telle relation soit déterminée et décrite dans le cadre d'une métathéorie syntaxique du langage formel du système de la science unifiée, et non pas dans le cadre de ce système lui-même. Il en découle que la réduction dont il est question dans *Testabilité et signification* est d'une nature différente de celle dont il est question dans *La Construction logique du monde* : alors que la seconde consiste à réduire des énoncés d'un certain type à des énoncés d'un autre type en vertu de leur contenu, c'est-à-dire en vertu des objets sur lesquels ils portent, dans le but de réduire des objets physiques à des vécus subjectifs, la première consiste à réduire des énoncés d'un certain type à des énoncés d'un autre type eu égard à leurs formes logiques respectives.

Ce qui distingue les quatre critères qu'analyse Carnap (1936b, 1937), ce sont, en revanche, deux contraintes supplémentaires, qui sont, encore une fois, de nature syntaxique, à savoir la forme logique des énoncés synthétiques qui sont considérés comme admissibles et la forme logique des chaînes introductives qui sont utilisés pour réduire, ou pour définir, les prédicats que contiennent ces mêmes

énoncés. Notamment, les critères de testabilité complète et de testabilité simple se ressemblent en ceci qu'ils exigent tous les deux que « si un énoncé synthétique S est donné, nous devons connaître une méthode de test pour tout prédicat descriptif [c'est-à-dire non purement logique] [*a method of testing for every descriptive predicate*] figurant dans S afin de pouvoir déterminer, pour des points adéquats [du *continuum* spatio-temporel] si on peut ou non leur attribuer ce prédicat » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 146). Dans les deux cas, il est donc nécessaire que les « énoncés de réduction » (« *reduction sentences* ») qui sont utilisés pour réduire tel ou tel énoncé synthétique, ou les énoncés qui sont utilisés pour le définir, décrivent des modalités de test (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 102). Ces mêmes critères diffèrent, en revanche, en ce qui concerne la forme logique qui doit caractériser l'énoncé S en question, puisque, d'après le critère de testabilité complète, ce dernier doit être un « énoncé moléculaire » (« *molecular sentence* ») – c'est-à-dire un énoncé que l'on peut construire en se servant uniquement de « symboles de connecteurs logiques » (« *connective symbols* »)⁷⁶ afin de lier plusieurs énoncés de forme atomique les uns aux autres – alors que, d'après le critère de testabilité simple, S peut tout aussi bien être un « énoncé généralisé » (« *generalized sentence* ») – c'est-à-dire un énoncé non atomique qui contient non seulement des symboles de connecteurs logiques, mais également un certain nombre de « symboles d'opérateurs » (« *operators* »)⁷⁷. De même, les critères de confirmabilité complète et le critère de confirmabilité simple se ressemblent dans la mesure où ils admettent tous les deux des chaînes introductives qui ne comportent pas que des énoncés identifiant des modalités de test concrètes, mais se distinguent en ceci que le premier n'admet que des énoncés synthétiques moléculaires, alors que le second admet également des énoncés généralisés. C'est ainsi que, afin de comparer ces quatre critères, Carnap (1936b, 1937) construit une échelle de langages $(L_n)_{0 \leq n \leq \infty}$, de complexité croissante, où chaque niveau contient tous les niveaux précédents. Pour ce faire, Carnap (1936b, 1937) utilise comme mesure de la complexité de tel ou tel langage le nombre maximal d'opérateurs universels et existentiels, ainsi que le nombre maximal d'arguments, que l'on peut trouver dans les énoncés qui le composent. Plus précisément, tous les énoncés des différents

⁷⁶ « *Symboles de connecteurs* [*connective symbols*] : ' \sim ' pour 'non' (négation) [*negation*], ' \vee ' pour 'ou' (disjonction) [*disjunction*], ' \cdot ' pour 'et' (conjonction) [*conjunction*], ' \supset ' pour 'si-alors' (implication) [*implication*], ' \equiv ' pour 'si-alors-, et si non-alors non-' (équivalence) [*equivalence*]. ' $\sim Q(a)$ ' est la négation d'un énoncé complet [*full sentence*] de ' Q ' ; on l'appelle aussi parfois un énoncé complet du prédicat ' $\sim Q$ ' » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 75).

⁷⁷ « *Opérateurs* [*operators*] : ' $(x) P(x)$ ' signifie : 'tous les points [du *continuum* spatio-temporel] ont la propriété P ' (énoncé *universel* [*universal sentence*] ; le premier ' (x) ' est appelé *opérateur universel* [*universal operator*], et la fonction propositionnelle ' $P(x)$ ' son *opérande* [*operand*]). ' $\exists x P(x)$ ' signifie : 'Il y a au moins un point qui a la propriété P ' (énoncé *existentiel* [*existential sentence*] ; le premier ' $(\exists x)$ ' est appelé l'*opérateur existentiel* [*existential operator*], et ' $P(x)$ ' son *opérande* [*operand*]) » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 76).

langages qui constituent l'échelle L_n appartiennent à l'une ou à l'autre de deux séries de classes, qui sont, elles aussi, de complexité croissante, à savoir la classe $(U_n)_{0 \leq n \leq \infty}$, où les énoncés de la classe U_n contiennent n opérateurs, dont le premier est un opérateur universel, et la classe $(E_n)_{0 \leq n \leq \infty}$, où les énoncés de la classe E_n contiennent n opérateurs, dont le premier est un opérateur existentiel. À parité de degré n , les énoncés de la classe E_n sont toujours considérés comme étant plus complexes que ceux de la classe U_n . Le langage le moins complexe, L_0 , contient, par exemple, les énoncés des classes E_0 et U_0 , qui coïncident l'une avec l'autre, en ceci que les signes métalinguistiques E_0 et U_0 ne sont rien d'autre que deux manières différentes de désigner la classe des énoncés qui ne possèdent aucun opérateur, c'est-à-dire les énoncés moléculaires tels « $M_1(a)$ », ou « $M_1(a) \wedge M_2(a)$ ». Le langage L_1 , contient, en revanche, les énoncés de L_0 et ceux de U_1 , tels $(x) M_1(x)$, alors que le langage L_2 contient les énoncés de L_1 et ceux de E_1 , tels « $\exists x M_1(x)$ », le langage L_3 contient les énoncés de L_2 et ceux de U_2 , tels « $(x) (\exists y) M_2(x, y)$ », le langage L_4 contient les énoncés de L_3 et ceux de E_2 , tels « $(\exists x)(y) M_2(x, y)$ », et ainsi de suite, si bien que, dans le cadre d'une telle suite infinie de langages, L_∞ se définit, précisément, comme étant le langage formel dont les énoncés n'ont pas de complexité maximale, en ceci qu'ils peuvent contenir un nombre quelconque d'opérateurs universels ou existentiels (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 137-138).

En conséquence, c'est précisément une telle construction syntaxique qui permet à Carnap (1936b, 1937) de conclure que le plus libéral des quatre critères de signification empirique qu'il est en train d'analyser, c'est-à-dire le critère de « confirmabilité simple » (« *confirmability* »), est également le plus avantageux, car il est compatible avec l'usage d'un langage empiriste et physicaliste qui comporte aussi bien des chaînes introductives qui contiennent des prédicats observables, en plus des prédicats réalisables, que des énoncés généralisés. C'est pourquoi il finit par retenir une telle exigence comme critère de confirmation, et donc également comme critère de signification empirique, permettant de reconstruire rationnellement le principe de l'empirisme. Le choix du critère de confirmabilité simple implique, néanmoins, deux conséquences majeures. Premièrement, afin de satisfaire les exigences syntaxiques qu'exprime ce même critère, il est possible de se servir de L_∞ , c'est-à-dire du langage empiriste et physicaliste le plus général, que Carnap (1936b, 1937) appelle « *langage généralisé confirmable* » (« *confirmable generalized language* »), afin de le distinguer de L_∞^t , c'est-à-dire le « *langage généralisé testable* » (« *testable generalized language* »), que l'on obtient en limitant l'extension de L_∞ de telle sorte qu'il ne contienne que des chaînes de test (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 147). En conséquence, le critère de confirmabilité simple permet, deuxièmement, de regarder comme étant doués de signification des « hypothèses incomplètement confirmables » (« *incompletely confirmable hypotheses* ») telles que celles qu'émettent les physiciens

lorsqu'ils décrivent, par exemple, l'évolution d'un système physique c au cours d'un intervalle de temps $t + d$:

$$(t) [P_1(c, t) \supset P_2(c, t + d)]$$

ce qui signifie, en d'autres termes, « Pour tout instant t , si le système c est à l'état P_1 au temps t , alors il sera à l'état P_2 au temps $t + d$ » (« *For every instant t , if the system c has the state P_1 at the time t , then it has the state P_2 at the time $t + d$* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 148). Cela dit, il n'en demeure pas moins vrai que ce critère de confirmabilité simple, tel que le définit Carnap (1936b, 1937) dans *Testabilité et signification*, n'est pas à même de fournir une méthode permettant de confirmer de telles hypothèses de manière complète par le biais d'observations ou d'expériences empiriques, ce qui était justement la raison pour laquelle Carnap (1936b, 1937) les qualifiait d'« incomplètement confirmables » (« *incompletely confirmable* ») : comme l'écrit lui-même, « un énoncé universel n'est pas vérifiable mais falsifiable ; un énoncé existentiel est vérifiable mais pas falsifiable » (« *a universal sentence is not verifiable but falsifiable ; an existential sentence is verifiable but not falsifiable* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 137). La seule chose que l'on peut affirmer avec certitude est, par conséquent, que toute observation qui confirme partiellement une hypothèse universelle en accroît, par le même biais, le degré de confirmation⁷⁸, ce qui soulève la question suivante : comment pourrait-on définir de manière rigoureuse, et donc quantifier, le degré auquel chaque observation ou chaque expérimentation « réussie » contribue à augmenter ou à diminuer la confirmation d'une certaine hypothèse, qui reste toujours incomplètement confirmable ? Autrement dit, en quoi pourrait-on reconstruire rationnellement le concept de degré de confirmation ?

⁷⁸ « Maintenant, considérons un énoncé de la forme : $\forall x\varphi(x)$. On a l'habitude de dire qu'un universel est d'autant plus confirmé que plus d'énoncés de la forme $\varphi(a)$, $\varphi(b)$, etc. sont confirmés. Bien entendu, $\forall x\varphi(x)$, est, certes, d'autant plus confirmé qu'est plus grand le nombre d'énoncés confirmés de la forme $\varphi(a)$, mais on ne peut réduire complètement la confirmation de $\forall x\varphi(x)$ à celle d'un ensemble fini, si grand soit-il, d'énoncés de la forme $\varphi(a)$. En termes logiques, on a bien $\forall x\varphi(x) \vdash \varphi(a)$, et cela implique que si $\varphi(a)$ est infirmé, $\forall x\varphi(x)$ l'est également ; mais si $\varphi(a)$ est confirmé, cela veut seulement dire que $\forall x\varphi(x)$ a des chances de l'être également. On dira en ce cas que la confirmation de $\forall x\varphi(x)$ est *directement et incomplètement réductible* à celle des énoncés de la forme $\varphi(a)$. Plus généralement, on dira que la confirmation d'un énoncé E [de la forme $\forall x\varphi(x)$] est incomplètement et directement réductible à la confirmation d'un ensemble infini C d'énoncés [de la forme $\varphi(a)$] si et seulement si les énoncés appartenant à C sont conséquences de E par substitution » (Schmitz 2009, p. 390).

1.3.2 Le concept de degré de confirmation comme probabilité logique et la construction d'un langage scientifique qui soit empiriquement significatif

En conséquence, c'est précisément dans la tentative de reconstruire rationnellement le concept de degré de confirmation, afin qu'il soit possible de le quantifier de manière rigoureuse, que consiste la deuxième étape de la démarche que suit Carnap (1936b, 1937, 1945a) dans les deux ouvrages que nous sommes en train d'analyser ici. Plus précisément, cette deuxième étape revient à édifier une théorie de la logique inductive⁷⁹, dans le but de rendre compte, au moyen d'un appareil logique qui soit adéquat à un tel objectif, de la manière dont une certaine donnée empirique peut augmenter ou diminuer le degré de confirmation de telle ou telle hypothèse. Pour ce faire, comme nous l'avons vu plus haut, Carnap (1945a) commence par définir le concept de « degré de confirmation de l'hypothèse h par la donnée e » (« *degree of confirmation of the hypothesis h on the evidence e* »), symbolisé par « $c(h, e)$ », où « h » est un énoncé qui exprime l'hypothèse en question, alors qu' e est un énoncé qui décrit tel ou tel état de choses observable – c'est-à-dire qu'il est « d'ordinaire un compte rendu de nos résultats d'observations » (« *usually a report on the results of our observations* ») – comme étant un « concept logique » (« *logical concept* ») de probabilité, c'est-à-dire la probabilité₁ (Carnap 1945a ; 2015b, p. 71). Ainsi défini, le degré de confirmation d'une hypothèse « h » en fonction de la donnée « e » n'est rien d'autre que l'expression d'une relation entre deux énoncés, et notamment l'expression d'une relation de « proximité logique » (« *logical proximity* ») que l'on peut quantifier en associant une « probabilité numérique » (« *numerical probability* ») à la probabilité logique en question. En effet, comme le rappelle Karl Popper (1959), la probabilité₁ dont parlait Carnap (1945a) n'est rien d'autre qu'« un type spécial de relation logique entre deux énoncés » (« *a special kind of logical relationship between two statements* ») dont les deux cas-limites sont, respectivement, « la déductibilité et la contradiction » (« *derivability and contradiction* »), si bien que l'on peut poser, par convention, qu'« un énoncé q 'donne'... la probabilité 1 à un autre énoncé, p , si p suit [logiquement] de q [*if p follows from q*] », alors qu'il lui donne la probabilité 0 si les deux énoncés se contredisent

⁷⁹ Comme l'explique Carnap (1950a) lui-même dans *Logical Foundations of Probability*, « le problème de l'induction au sens le plus large du terme [*the problem of induction in the widest sense*] – en ce qui concerne une hypothèse d'une forme quelconque, et non nécessairement universelle – n'est essentiellement pas autre chose que le problème de la relation logique qui existe entre une hypothèse et des preuves qui la confirment [*essentially the same as the problem of the logical relation between a hypothesis and some confirming evidence for it*]. Par conséquent, en donnant une définition du concept de degré de confirmation [*a definition of the concept of degree of confirmation*] et en édifiant une théorie logique [*a logical theory*] qui soit fondée sur ce même concept, nous aurons établi un système de logique inductive [*a system of inductive logic*] » (Carnap 1950a, p. 2).

mutuellement. En conséquence, dans tous les autres cas – qui sont, pour ainsi dire, « intermédiaires » –, il est possible de quantifier la relation de probabilité logique qui existe entre les énoncés « p » et « q » à l'aune du principe suivant : « la probabilité numérique [que l'on peut associer à la probabilité logique] d'un énoncé p (étant donné q) est d'autant plus grande que son contenu excède moins ce que comprend déjà cet énoncé q dont dépend la probabilité de p » (« *the numerical probability of a statement p (given q) is the greater the less its content goes beyond what is already contained in that statement q upon which the probability of p depends* ») (Popper 1959 ; 1973, p. 148-149)⁸⁰. Il en découle que tout énoncé vrai concernant le degré de confirmation d'une hypothèse « h » relativement à la donnée « e » est, par nature, analytique, en ceci que sa vérité dépend uniquement des formes logiques que possèdent les énoncés « h » et « e », ainsi que des relations, elles-mêmes de nature purement logique, qu'ils entretiennent entre eux, et non pas de considérations qui portent sur des états de choses empiriquement observables. C'est précisément une telle reconstruction rationnelle (partielle) de la notion de probabilité comme probabilité₁ que lui permet, ainsi, de formuler un certain nombre de règles qui s'appliquent aux énoncés d'un langage formel donné, semblable au langage empiriste et physicaliste L dont nous venons de parler, et dont la fonction consiste à attribuer une certaine valeur de probabilité, en tant que « concept métrique » (« *metrical concept* ») (Carnap 1945b), à un énoncé synthétique, « j », en vertu de la relation de probabilité logique qu'il entretient avec une certaine classe d'énoncés synthétiques, « i », qui ont une forme logique particulière, puisqu'ils ne sont rien d'autre que des « *descriptions d'états* » (« *state-descriptions* ») possibles de la réalité que l'on peut formuler dans le cadre du langage formel en question (Carnap 1945a ; 2015b, p. 73 ; Carnap 1945b ; 2015b, p. 49), et qui sont donc formellement équivalents aux énoncés atomiques dont il est question dans *Testabilité et signification*.

Il s'agit, en conséquence, de règles que Carnap (1945a, 1945b) qualifiait de « sémantiques » (« *semantical* »), en se référant directement à Tarski (1944), en ceci qu'elles nous permettent de « saisir [les] significations » (« *graps [the] meanings* ») des énoncés en question et de « découvrir certaines relations [entre énoncés] basées sur leurs significations » (« *to discover certain relations which are based upon their meaning* ») (Carnap 1945b ; 2015b, p. 48). Cependant, elles sont des

⁸⁰ L'on peut trouver, d'ailleurs, une définition du concept de probabilité tout à fait similaire chez Wittgenstein (1922) : « 5.152 – Les propositions qui n'ont en commun aucun argument de vérité [*'no truth-arguments in common with one another'*] nous les nommerons mutuellement indépendantes [*'independent of one another'*]. Deux propositions élémentaires se confèrent mutuellement [*'give one another'*] la probabilité 1/2. Si p suit de q , la proposition ' q ' confère à la proposition ' p ' la probabilité 1. La certitude de la déduction logique est un cas limite de la probabilité [*'The certainty of logical inference is a limiting case of probability'*]. (Application à la tautologie et à la contradiction) » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 75).

règles sémantiques d'une nature particulière, que Carnap (1934, 1942, 1945a) appelait « L-règles (de transformation) » (« *L-(Umformungs)bestimmungen* », « *L-(transformative) rules* »). Plus précisément, ce sont des règles qui décrivent ce qu'on pourrait appeler, en adoptant un mode de discours contentuel, des relations purement « logico-mathématiques » (« *logisch-mathematisch* ») et que Carnap (1934) introduit, pour la première fois, dans *Die logische Syntax der Sprache*, en tant que règles purement syntaxiques, pour les opposer à ce qu'il appelle les « P-règles de transformation » (« *P-Umformungsbestimmungen* », « *P-transformative rules* »). Ces dernières sont, en effet, des règles de transformation que l'on peut qualifier de « physiques » (« *physikalisch* ») en ceci qu'elles permettent de dériver une formule, représentant un certain énoncé, d'une autre formule, représentant un autre énoncé, en établissant, entre ces dernières, des relations linguistiques qui ne peuvent qu'être déterminées à l'aune d'observations empiriques (Carnap 1934, p. 133). D'un point de vue purement formel, les L-règles de transformation dont parle Carnap (1934) dans *Die logische Syntax der Sprache* se distinguent, en revanche, des P-règles de transformation par ce qu'on pourrait appeler un principe de « substituabilité générale des expressions descriptives » (« *allgemeine Ersetzbarkeit deskriptiver Ausdrücke* ») (Carnap 1934, p. 134). Autrement dit, si l'on considère un ensemble d'énoncés, K_1 , et la classe de leurs conséquences logiques (« *Folgeklasse* »), K_2 , en les choisissant de telle manière que l'un ou l'autre contienne des prédicats descriptifs – et donc logiquement « indéterminés » (« *unbestimmt* ») –, les L-règles qui s'appliquent à ces deux ensembles d'énoncés sont les règles qui permettent de former les énoncés d'un troisième ensemble, K_3 , à partir de ceux de K_1 , tout simplement en remplaçant les prédicats descriptifs qui apparaissent dans ces derniers par des prédicats de la même nature, ainsi que de former les énoncés d'un quatrième ensemble, K_4 , à partir de ceux de K_2 , toujours en remplaçant les mêmes prédicats descriptifs par les mêmes prédicats alternatifs, de telle sorte que K_4 s'avère être la classe des conséquences logiques des énoncés de K_3 (Carnap 1934, p. 134). En tant que règles qui relèvent de la syntaxe logique d'un langage donné, c'est-à-dire telles que Carnap (1934) les présente dans *Die logische Syntax der Sprache*, les L-règles de transformation constituent, au même titre que les P-règles, une classe particulière de ce que Carnap (1934) lui-même qualifiait de « règles de conséquence », ou « C-règles » (« *F(olge)-Bestimmungen* », « *C(onsequence)-rules* »), c'est-à-dire des règles qui permettent de généraliser les concepts de « déduction » (« *Ableitung* ») et de « démonstration » (« *Beweis* »)⁸¹ à des classes de prémisses qui sont potentiellement infinies

⁸¹ Par « déduction à partir d'une classe de prémisses K_1 », Carnap (1934) entendait « une suite finie d'énoncés [*endliche Reihe von Sätzen*] » qui appartiennent à K_1 ou que l'on peut dériver par déduction immédiate (« *unmittelbar ableitbar* ») « d'une classe d'énoncés, K_2 , qui les précèdent dans la suite elle-même [*in der Reihe vorangehen*] » (Carnap 1934, p. 124), alors qu'il définissait la démonstration comme « déduction à partir d'une classe de prémisses vide » (« *eine Ableitung mit leerer Prämissenklasse* ») (Carnap 1934, p. 124).

(« *indefinit* »), et donc à un nombre potentiellement infini d'étapes de déduction, en stipulant que « l'énoncé S_1 est une conséquence directe [*unmittelbare Folge*] de la classe d'énoncés [*Satzklasse*] K_1 (mais non seulement de K_1) lorsque S_1 et K_1 possèdent telles ou telles propriétés syntaxiques [*die und die syntaktischen Eigenschaften*] », tout en sachant que « S_1 est toujours [*stets*] une conséquence directe de $\{S_1\}$ », c'est-à-dire du singleton qui contient uniquement l'énoncé S_1 lui-même (Carnap 1934, p. 124)⁸². En tant que règles sémantiques, et plus précisément L-sémantique (« *L-semantic* ») (Carnap 1939), les L-règles de transformation sont, par conséquent, des règles internes au langage objet lui-même (dans ce cas, un langage semblable au langage empiriste et physicaliste L dont il est question dans *Testabilité et signification*), en ceci qu'elles ne renvoient à aucun objet ou à aucune propriété extralinguistique, dont la fonction consiste à décrire les conditions de vérité d'un énoncé donné en termes purement logiques, et notamment en termes de relations logiques entre énoncés, sans faire aucune référence à ce que désignent les termes qui le composent. La raison pour laquelle on peut les considérer comme étant des règles sémantiques consiste, en effet, en ceci qu'elles reposent sur la convention suivante, que Carnap (1947) comprenait comme étant, tout simplement, « un *explicatum* [c'est-à-dire une explicitation] de ce que Leibniz appelait vérité nécessaire et Kant vérité analytique » (« *as an explicatum for what Leibniz called necessary truth and Kant analytic truth* ») (Carnap 1947 ; 1997, p. 57) : « Un énoncé S_i est **L-vrai** [*L-true*] dans un système sémantique S si et seulement si S_i est vrai dans S [*S_i is true in S*] d'une manière telle que sa vérité puisse être établie sur la base des seules règles sémantiques de S [*its truth can be established on the basis of the semantical system S alone*], sans référence à des faits (extralinguistiques) [*(extralinguistic) facts*] » (Carnap 1947 ; 1997, p. 60). Par conséquent, c'est précisément sur la base de la définition du degré de confirmation comme probabilité logique quantifiable, que Carnap (1945a) peut interpréter la logique inductive comme consistant dans « la théorie du degré de confirmation » (« *theory of the degree of confirmation* ») en tant que théorie de l'implication logique, ou « L-implication » partielle (« *partial L-implication* »), c'est-à-dire en tant que théorie d'un « L-concept » (« *L-Begriff* », « *L-concept* ») que l'on peut définir par le biais des L-règles sémantiques dont nous venons de parler et qu'il s'agit donc de reconstruire rationnellement par l'intermédiaire d'un langage-système qui soit adéquat à ce but (Carnap 1945a ; 2015b, p. 72).

⁸² C'est précisément la nature « infinitaire » (« *infinitary* ») des C-règles qui les distingue d'une autre classe de règles de déduction dont se sert Carnap (1934), toujours dans *Die logische Syntax der Sprache*, pour décrire la syntaxe logique d'un langage formel, c'est-à-dire ce qu'il qualifiait de « règles de déduction », ou « D-règles » (« *A(bleitungs)-Bestimmungen* », « *D(eduction)-rules* »), c'est-à-dire des règles de déduction ou de démonstration qui comportent un nombre fini d'étapes, et qui sont donc « finitaire » (« *finitary* ») (Carnap 1934, p. 124). Pour plus de précisions à ce sujet, voir de Rouilhan (2009).

C'est pourquoi Carnap (1945a) tâche de fournir une reconstruction rationnelle du concept de degré de confirmation en l'introduisant, encore une fois, dans le cadre d'une échelle de langages formels $(L_N)_{1 \leq N \leq \infty}$ de complexité croissante. Dans ce cas, néanmoins, le niveau de complexité de chaque langage est déterminé par le nombre d'individus qui sont présents dans l'univers auquel il se réfère, si bien que le langage L_N fait référence à « un univers fini contenant seulement N individus » (« *a finite universe containing only N individuals* »), qui sont désignés par les constantes individuelles « a_1 », « a_2 », ..., « a_N », alors que le langage L_∞ fait référence à « un univers infini d'individus » (« *an infinite universe of individuals* »), désignés par les constantes « a_1 », « a_2 », ... (Carnap 1945a ; 2015b, p. 72). Tous ces langages contiennent, en revanche, des variables d'individus « x_1 », « x_2 », etc., « un nombre fini de prédicats d'arité quelconque [*'a finite number of predicates of any degree'*] (le nombre d'arguments), désignant des propriétés d'individus [*'properties of the individuals'*] ou des relations entre eux [*'relations between them'*] », les symboles des connecteurs logiques usuels (« \sim » pour la négation, « \vee » pour la disjonction et « \cdot » pour la conjonction), « le signe d'identité entre individus » (« *the sign of identity between individuals* »), « = », ainsi que le signe « t » comme symbole désignant une tautologie quelconque (Carnap 1945a ; 2015b, p. 73). C'est ainsi que, en associant ces différents signes selon des règles syntaxiques données, de tels langages permettent de formuler des énoncés de formes différentes, dont les plus simples sont ce que Carnap (1945a) appelle, justement, les « *phrases atomiques* » (« *atomic sentences* »), c'est-à-dire des énoncés composés « d'un prédicat de degré n avec n constantes d'individu » (« *a predicate of degree n with n individual constants* »), telles que, par exemple, les énoncés « Pa_1 », qui signifie « l'individu que désigne la constante a_1 possède la propriété que désigné le prédicat P », et « Ra_3a_5 », qui signifie « les individus que désignent les constantes a_3 et a_5 sont, l'un avec l'autre, dans la relation que désigne le prédicat R ». Ce sont de tels énoncés qui permettent de formuler de possibles « *descriptions d'états* » (« *state-descriptions* ») du domaine d'individus auquel fait référence tel ou tel langage. Par exemple, dans le cas d'un langage fini L_N , une possible description de l'état du domaine d'individus pertinent, formulée dans le langage L_N , n'est rien d'autre que l'énoncé que l'on peut obtenir en effectuant la conjonction d'un certain nombre de phrases atomiques de ce même langage et des négations de toutes les autres phrases atomiques, de même que, dans le cas du langage infini L_∞ , une description d'état est « une classe contenant certaines phrases atomiques et la négation des phrases atomiques restant [*'a class containing some atomic sentences and the negations of the remaining atomic sentences'*] ; puisque cette classe est infinie, elle ne peut être transformée en une conjonction » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 73). En conséquence, c'est précisément sur la base de ces phrases atomiques qu'il est possible de formuler des règles L-sémantiques « qui déterminent pour toute phrase j donnée et toute description d'état i si j vaut dans i [*'whether j holds in i '*], c'est-à-dire si j serait vraie si i décrivait

l'état réel [*'the actual state'*] [du domaine d'individus pertinent] parmi tous les états possibles [*'among all possible states'*] », et qui permettent, par ce même biais, d'identifier le « champ » (« *range* ») d'une phrase, ou énoncé, « *j* » donnée dans un certain langage *L*, c'est-à-dire « la classe de ces descriptions d'état dans un langage *L*... dans lesquelles *j* vaut » (« *the class of those state-descriptions in a language system L... in which j holds* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 73).

Comme l'avait déjà observé Wittgenstein (1922)⁸³, affirme ensuite Carnap (1945a), les règles L-sémantiques et le concept de champ, définis d'une telle manière, permettent de classer les différents énoncés que l'on peut formuler dans tel ou tel langage *L* selon leur forme logique, ainsi que de définir les concepts d'implication et d'équivalence logiques, par opposition aux concepts d'implication et d'équivalence matérielles⁸⁴. Par exemple, « si le champ d'une phrase *j* dans le système linguistique *L* est universel [*'universal'*], c'est-à-dire si *j* vaut dans toute description d'état [*'if j holds in every state-description'*] (dans *L*) », alors « *j* » est un énoncé logiquement vrai, « L-vrai » (« *L-true* »), c'est-à-dire un énoncé qui est vrai indépendamment de toute considération factuelle, et qui est donc analytique ou tautologique, alors que si le champ de « *j* » dans *L* est nul (« *is null* »), c'est-à-dire s'il

⁸³ « 4.463 – Les conditions de vérité déterminent [le champ] laissé aux faits par la proposition [*'the truth-conditions of a proposition determine the range that it leaves open to the facts'*]. (La proposition, l'image, le modèle sont, en un sens négatif, comme un corps solide qui limite la liberté de mouvement des autres corps [*'a solid body that restricts the freedom of movement of others'*]; dans un sens positif, comme l'espace borné par une substance solide, où un corps peut être placé [*'a space bounded by solid substance in which there is room for a body'*].) La tautologie [*'tautology'*] laisse à la réalité la totalité – infinie – de l'espace logique [*'a the whole – the infinite whole – of logical space'*]; la contradiction [*'contradiction'*] remplit la totalité de l'espace logique et ne laisse à la réalité aucun point [*'leaving no point of it for reality'*]. Aucune des deux ne peut onc déterminer en quelque manière la réalité [*'determine reality in any way'*] » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 69).

⁸⁴ L'implication et l'équivalence matérielles se définissent par rapport à un système linguistique, *S*, comportant des règles sémantiques, dont la fonction consiste à déterminer les conditions de vérité des énoncés du langage en question, et qui reposent, en dernière instance, sur des règles de désignation, c'est-à-dire sur des règles qui déterminent la signification de tel ou tel terme descriptif de ce même langage, qu'il s'agisse d'une constante individuelle ou d'un prédicat, en précisant l'entité qu'il désigne (Carnap 1942), comme, par exemple, les règles suivantes : le terme « *a*₁ » désigne, par définition, une entité *u* dans le système *S* si « *a*₁ » et *u* sont, respectivement, le premier et le second élément de l'un parmi les couples ordonnés suivants : (« *a* », « Chicago »), (« *b* », « New York »), (« *c* », « Carmel »), (« *P* », « la propriété d'être grand »), (« *Q* », « la propriété d'avoir un port ») (Carnap 1942, p. 32). C'est ainsi que, pour toute paire d'énoncés « *s*₁ » et « *s*₂ », « *s*₁ » implique (matériellement) « *s*₂ » si et seulement si les deux conditions suivantes sont remplies : « *s*₁ » et « *s*₂ » appartiennent à *S* et si « *s*₁ » est vrai d'après les règles sémantiques qui sont propres à ce dernier, alors « *s*₂ » ne peut pas être faux. En revanche, « *s*₁ » est (matériellement) équivalent à « *s*₂ » si et seulement si ces autres conditions sont remplies : « *s*₁ » et « *s*₂ » appartiennent à *S* et, d'après les règles sémantiques qui sont propre à ce dernier, ils sont soit tous les deux vrais, soit tous les deux faux (Carnap 1942, p. 36).

définit une classe vide, alors « j » est un énoncé logiquement faux, « L-faux » (« *L-false* »), c'est-à-dire un énoncé qui est faux quel que soit l'état réel de son domaine de référence, et qui est donc contradictoire. Il s'ensuit que tout énoncé « j » qui n'est ni L-vrai, ni L-faux, en raison du champ auquel il est associé dans tel ou tel langage, est un énoncé dont la valeur de vérité dépend de considérations factuelles, c'est-à-dire un énoncé synthétique. En outre, si le champ d'un énoncé « e » est inclus dans le champ d'un énoncé « h », alors, chaque fois que le premier est vrai, le second l'est également, bien que l'inverse ne soit pas nécessairement vrai : autrement dit, si tel est le cas, « e L-implique (implique logiquement, a pour conséquence) h » (« *e L-implies (logically implies, entails) h* »). En revanche, « si deux phrases ont le même champ, nous disons qu'elles sont L-équivalentes [*L-equivalent*] » ; dans ce cas, ce sont seulement deux formulations différentes du même contenu [*they are merely different formulations for the same content*] » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 73-74). Carnap (1945a) en conclue, ainsi, que le système de langages formels qu'il vient de définir, et notamment les règles et les concepts L-sémantiques qui y sont associés, constitue la base pour édifier aussi bien des systèmes de logique déductive que des systèmes de logique inductive, puisque la différence entre ces deux types de systèmes consiste en ceci que le second inclue, précisément, le concept de degré de confirmation, qui est absent dans le premier : alors que, en logique déductive, un énoncé de la forme « e L-implique h » signifie que « le champ de e », c'est-à-dire son contenu, est « entièrement inclus dans celui de h » (« *the range of e is entirely included in that of h* »), en logique inductive, un énoncé de la forme « $c(h, e) = p$ », avec $p \in [0,1]$, signifie que seule « une certaine partie », c'est-à-dire seule une fraction p , « du champ de e est incluse dans le champ de h » (« *a certain part...of the range of e is included in the range of h* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 75). Cela dit, comment Carnap (1945a) parvient-il donc à reconstruire le concept de degré de confirmation sur la base du système de langages formels qu'il a établis, ainsi que des règles et des concepts L-sémantiques qu'il a définis ? Pour ce faire, il procède en trois étapes : premièrement, la définition d'une classe de fonctions numériques, non négatives, qu'il appelle « c -fonctions régulières » (« *regular c-functions* ») et qui attribuent une valeur appartenant à l'intervalle $[0,1]$ à chaque énoncé du langage formel L en question ; deuxièmement, la définition d'une sous-classe particulière de c -fonctions régulières, appelées « c -fonctions symétriques » (« *symmetrical c-functions* ») ; troisièmement, la définition d'un concept formel et quantifiable de degré de confirmation, « c^* », sur la base de ces mêmes fonctions (Carnap 1945a ; 2015b, p. 74). Mais en quoi consistent, plus précisément, ces trois étapes et en quoi sont-elles logiquement reliées les unes aux autres ?

Comme première chose, Carnap (1945a) définit une classe particulière de fonctions m « assignant des nombres réels de l'intervalle 0 à 1 aux phrases d'un langage fini L_N » (« *ascribing real numbers of the interval 0 to 1 to the sentences of a finite language L_N* »), qu'il appelle « m -fonctions

régulières » (« *regular m-functions* »), d'après les règles suivantes : (1) chaque fonction « *m* » assigne aux descriptions d'état de L_N , « *i* », des valeurs réelles, appartenant à $[0,1]$, de telle sorte que leur somme totale soit égale à 1 ; (2) la valeur de « *m* » pour tous les autres énoncés de L_N , « *j* », c'est-à-dire « *m(j)* » se détermine de la manière suivante : si « *j* » n'est pas L-faux, alors la valeur de « *m(j)* » est égale à la somme des valeurs « *m(i)* » de toutes les descriptions d'état qui appartiennent au champ de « *j* », sinon $m(j) = 0$, car, s'il s'agit d'un énoncé L-faux, et donc contradictoire, son champ est, par définition, nul. Il en découle que toute valeur qu'une certaine *m*-fonction régulière « *m* » attribue à un énoncé « *j* » peut être considérée comme une mesure de l'étendue du champ qui est associé à ce même énoncé. C'est pourquoi Carnap (1945a) se sert de la classe des *m*-fonctions régulières, ainsi définies, comme d'une métrique pour les champs des énoncés de L_N , afin de déterminer une classe de *c*-fonctions telles que, « pour toute paire de phrases *e, h* dans L_N , où *e* n'est pas L-fausse » (« *for any pair of sentences e, h in L_N, where e is not L-false* »),

$$c(h, e) = \frac{m(e \cdot h)}{m(e)}$$

qu'il appelle, justement, la classe des « *c*-fonctions régulières » du langage fini L_N (Carnap 1945a ; 2015b, p. 74-75)⁸⁵. Comme le champ de la conjonction « $e \cdot h$ » n'est rien d'autre que l'ensemble des

⁸⁵ Comme l'explique S. L. Zabell (2007), Carnap (1945a) adopte ici une approche « constructiviste » de la définition de la classe des *c*-fonctions régulières, en tant que fonctions de confirmation, qui s'inspire de celle qu'avait déjà développée le mathématicien Friedrich Waismann (1930). Néanmoins, « de telles fonctions avaient déjà été étudiées par Janina Hosiasson-Lindebaum (1940) une décennie auparavant. Contrairement à Carnap [(1945a)], Hosiasson-Lindebaum [(1940)] a adopté une approche purement axiomatique [*'a purely axiomatic approach'*] : elle a étudié les propriétés générales des fonctions de confirmation $c(h, e)$ [*'the general properties of confirmation functions $c(h, e)$ '*], en supposant uniquement qu'elles satisfassent un certain ensemble d'axiomes fondamentaux. Dans la littérature scientifique, il existe plusieurs versions équivalentes d'un tel ensemble ; en voici une formulation particulièrement simple :

Lex axiomes de confirmation

$$\begin{aligned} 0 &\leq c(h, e) \leq 1 \\ \text{si } h &\leftrightarrow h' \text{ et } e \leftrightarrow e', \text{ alors } c(h, e) = c(h', e') \\ \text{si } e &\rightarrow h, \text{ alors } c(h, e) = 1 \\ \text{si } e &\rightarrow \sim (h \wedge h'), \text{ alors } c(h \vee h', e) = c(h, e) + c(h', e) \\ c(h \wedge h', e) &= c(h, e) \cdot c(h', h \wedge e) \end{aligned}$$

descriptions d'état de L_N qui sont communes au champ de « e » et au champ de « h », toute valeur « $c(h, e)$ » de l'une des c -fonctions régulières, ainsi définies, peut être considérée comme étant une mesure de la fraction du champ de l'énoncé « e » qui est commune au champ de l'énoncé « h », c'est-à-dire comme étant une mesure de la relation de proximité logique, en tant qu'homologue inductif de la relation de L-implication, qui existe entre le premier et le second⁸⁶. C'est ainsi que, ayant donné une telle définition de la classe des c -fonctions régulières pour un langage formel fini L_N , Carnap (1945a) l'étend également au cas d'un langage formel infini L_∞ . En effet, si l'on donne « une suite de m -fonctions régulières [*a sequence of regular m-functions*]', une pour chacun des langages finis L_N ($N = 1, 2, \text{etc.}$) », l'on peut définir une m -fonction correspondante pour un langage infini, dont les valeurs ne sont rien d'autre que les limites, pour $N \rightarrow \infty$, des valeurs des m -fonctions de la suite en question, pourvu qu'elles existent. Plus précisément, l'on peut poser que « $m(j)$ dans L_∞ est la limite des valeurs [*the limit of the values*] $m(j)$ dans L_N pour $N \rightarrow \infty$ », d'où il en découle que « $c(h, e)$ dans L_∞ est la limite des valeurs $c(h, e)$ dans L_N pour $N \rightarrow \infty$ » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 76). Ce que Carnap (1945a) appelait « la théorie des c -fonctions régulières » (« *the theory of regular c-functions* »), c'est-à-dire l'ensemble des théorèmes que l'on peut déduire des définitions que nous venons d'analyser, constitue, par conséquent, « la première partie, et la partie fondamentale, de la logique inductive » (« *the first and fundamental part of inductive logic* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 76)⁸⁷, mais non pas la seule. Comme l'observait toujours ce dernier, afin de reconstruire

Les probabilités conditionnelles [*conditional probabilities*] $c(h, e)$ de Carnap [1945a] satisfaisaient ces axiomes (et elles étaient, par conséquent, des candidats plausibles au rôle de fonctions de confirmations) » (Zabell 2007, p. 275-276).

⁸⁶ Néanmoins, comme la définition de toute c -fonction régulière particulière dépend du choix de la métrique « m », il est nécessaire d'identifier un critère qui rende un tel choix le moins arbitraire possible, en permettant, par exemple, de changer m « en fonction de l'expérience accumulée » (« *according to accumulating experiences* »). Pour cette raison, Carnap (1945a) redéfinit la classe des c -fonctions régulières pour un langage fini L_N de la manière suivante. Soit « i » une description d'état et « e » un énoncé « non-L-faux » (« *non-L-false* »), tous les deux appartenant au langage L_N . Pour toute m -fonction régulière « m », nous pouvons donc définir une fonction « m_e », de la même nature, telle que $m_e(i) = 0$, si i n'appartient pas au champ de « e », et que $m_e(i) = \frac{m(i)}{m(e)}$, s'il en est autrement. Comme une telle fonction n'est rien d'autre qu'« une métrique pour les descriptions d'état qui varie avec la donnée variable e » (« *a metric for the state-descriptions which changes with the changing evidence e* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 75), mais dont les propriétés formelles sont les mêmes que celles de la métrique m , nous pouvons donner une définition alternative, quoiqu'équivalente à la première, de la fonction « c » correspondant à la fonction « m » que l'on a choisie. Cette définition est donc la suivante : « pour toute paire de phrases e, h , dans L_N , où e n'est pas L-fausse, $c(h, e) = m_e(h)$ » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 75).

⁸⁷ « Il s'avère que nous découvrons ici de nombreux théorèmes fondamentaux de la théorie classique des probabilités [*many of the fundamental theorems of the classical theory of probability*]', par exemple ceux qui sont connus comme les

rationnellement le concept de probabilité, en tant que degré de confirmation d'un énoncé, au moyen d'une classe de fonctions qui permettent d'en faire une quantité mesurable, il est nécessaire de prendre en considération une contrainte supplémentaire à celles qui sont déjà incorporées dans la définition de la classe des c -fonctions régulières que nous venons d'analyser.

Tel que le reconstruit Carnap (1945a) dans *Sur la logique inductive*, un énoncé, relevant de la logique inductive, qui a la forme « $c(h, e) = p$ », et qui signifie, par conséquent, « la donnée e confère à l'hypothèse h une probabilité₁ à laquelle on peut attribuer une valeur numérique p », est, en effet, un énoncé qui porte sur la relation de proximité qui existe entre les formes logiques des deux énoncés en question, indépendamment de leur contenu. Il en découle que, si l'on considère des énoncés « h' » et « e' » qui ont la même forme logique que les énoncés « h » et « e », mais un contenu différent, en ceci qu'ils contiennent les mêmes symboles de prédicats, les mêmes symboles de relations, ainsi que les mêmes connecteurs logiques, disposés dans le même ordre, mais des constantes ou des variables individuelles qui sont différentes, alors l'on remarquera que la même relation de proximité logique qui subsiste entre « h » et « e » subsiste nécessairement entre « h' » et « e' » aussi⁸⁸. En conséquence, si l'on substitue les énoncés « h » et « e » par les énoncés « h' » et « e' » dans « $c(h, e)$ », l'on trouvera le même résultat : $c(h, e) = c(Pd, "Pa \cdot Pb \cdot \sim Pc") = p = c(Pc, "Pa \cdot Pd \cdot \sim Pb") = c(h', e')$. Cela signifie que toute fonction « c » qui est susceptible d'apparaître dans des énoncés de cette forme doit être symétrique, et donc assigner les mêmes valeurs à des paires d'énoncés isomorphes, c'est-à-dire à des paires d'énoncés ayant la même forme logique, si bien que la deuxième étape de la reconstruction formelle du concept de degré de confirmation qu'effectue ici Carnap (1945a) consiste à identifier, dans la classe des c -fonctions régulières, celles qui possèdent précisément une telle propriété. Mais comment pourrait-on définir des fonctions de cette nature ? Afin de répondre à une telle question, l'on peut remarquer que les mêmes considérations que nous venons de faire au sujet de l'équivalence des paires d'énoncés ayant la même forme, quant à leurs relations de proximité logique, valent également, *a fortiori*, pour les descriptions d'états, puisque ces dernières ne sont, par définition, rien d'autre que des équivalents, dans le système de

théorèmes (ou principes) de multiplication, les théorèmes généraux et spéciaux de l'addition, le théorème de la division et, fondé sur eux, le théorème de Bayes » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 76).

⁸⁸ Comme l'écrivait Carnap (1945a) lui-même, « la logique inductive devrait, comme la logique déductive, ne faire aucune distinction entre les individus [*inductive logic should, like deductive logic, make no discrimination among individuals*']. En d'autres termes, la valeur de c ne devrait être influencée que par ces différences entre les individus qui sont exprimées dans les deux phrases en jeu [*only by those differences between individuals which are expressed in the two sentences involved*']; aucune différence entre les individus particuliers ne doit être stipulée par les règles de la logique déductive ou inductive » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 80).

logique inductive que Carnap (1945a) est ici en train de construire, des « états de choses » (« *Sachverhalte* », « *states of affairs* ») dont parlait Wittgenstein (1922)⁸⁹, c'est-à-dire puisqu'elles ne sont rien d'autre que des descriptions des configurations possibles des connexions existant entre des objets donnés, et non pas des descriptions directes de ces mêmes objets. C'est pourquoi nous pouvons définir une classe d'*m*-fonctions régulières, pour un langage L_N , qui sont également symétriques, tout simplement en posant la condition qu'elles doivent assigner « à deux descriptions d'états isomorphes quelconques (dans L_N) des valeurs égales » (« *to any two isomorphic state-descriptions (in L_N) equal values* »). Plus précisément, par « descriptions d'états isomorphes », nous entendons ici deux descriptions d'états telles que l'une puisse être formée à partir de l'autre « par des remplacements du genre suivant » (« *by replacements of the following kind* ») : si l'on considère n'importe quelle relation biunivoque R dont le domaine d'individus coïncide avec « la classe de toutes les constantes individuelles dans L_N » (« *the class of all individual constants in L_N* »), tout comme celui de sa relation converse, R^{-1} , il est possible de transformer une description d'état donnée en une description isomorphe en remplaçant toutes les constantes individuelles qui y figurent par les constantes qui leur sont associées par R (Carnap 1945a ; 2015b, p. 80). Par conséquent, c'est précisément sur la base des *m*-fonctions symétriques ainsi définies qu'il est possible de déterminer une sous-classe de *c*-fonctions symétriques, qui ne sont rien d'autre que les *c*-fonctions qui se fondent sur les *m*-fonctions en question. C'est ainsi que, dans la troisième et dernière étape de son argument, Carnap (1945a) se sert d'une telle sous-classe de *c*-fonctions régulières afin de définir le concept de degré de confirmation, « c^* », d'une manière rigoureuse.

Pour ce faire, Carnap (1945a) reprend à son compte la définition du concept de « structure » (« *structure* ») en tant que « 'nombre-de-relation' d'une relation donnée » (« *'relation-number' of a given relation* ») qu'avait donnée Bertrand Russell (1919), c'est-à-dire en tant que « classe des relations semblables à cette relation » (« *class of all those relations that are similar to the given relation* ») (Russell 1919 ; 1991, p. 124)⁹⁰, en l'étendant à des relations d'arité quelconque. Plus

⁸⁹ « 2.01 – L'état de choses est une connexion d'objets (entités, choses) » (« *A state of affairs (a state of things) is a combination of objects (things)* ») (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 34).

⁹⁰ Plus précisément, Russell (1919) définissait la « similitude » (« *similarity* »), en tant que relation entre relations, habituellement dyadiques, de la manière suivante : « On dit qu'une relation S est une 'correspondance régulière' [*'correlator'*], ou encore une 'correspondance ordinale' [*'ordinal correlator'*] de deux relations P et Q si S est de un à un [donc biunivoque], a pour codomaine le champ [*'field'*] de Q [c'est-à-dire la classe unique que constituent le domaine et le codomaine de Q], et est telle que P est la composée de S , de Q , et de la converse de S », si bien que « deux relations P et Q sont dites 'similaires' [*'similar'*], ou 'semblables' [*'to have likeness'*], quand il existe au moins une correspondance régulière [*'at least one correlator'*] de P avec Q » (Russell 1919 ; 1991, p. 122).

précisément, il considère la classe des n_i descriptions d'états, dans un langage fini L_N , qui sont isomorphes à une description d'état donnée, « i », y compris la description « i » elle-même, et qui exhibent, par conséquent, « une même structure de l'univers de L_N relativement à toutes les propriétés et relations désignées par les prédicats primitifs dans L_N » (« *one and the same structure of the universe of L_N with respect to all the properties and relations designated by the primitive predicates in L_N* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 81). De cette manière, il peut définir « une description de structure dans L_N » (« *a structure-description in L_N* »), « j », comme étant tout simplement la disjonction de toutes les descriptions d'états « i », « i' », « i'' », etc., qui appartiennent à la même classe de descriptions isomorphes, c'est-à-dire $i \vee i' \vee i'' \vee \dots$, et donc comme étant un énoncé de L_N dont le champ ne contient que les descriptions isomorphes en question. Il s'ensuit que, par la définition même de ce qu'est une m -fonction régulière et symétrique « m », la valeur de « $m(j)$ » est égale à la somme des valeurs des n_i descriptions d'états appartenant au champ de « j », que l'on peut considérer comme étant toutes la même, du moment qu'elles sont, comme nous venons de le voir, isomorphes à la même description « i » et que la fonction « m » que l'on a choisi est symétrique, si bien que

$$m(j) = n_i \times m(i)$$

En conséquence, si la valeur de « $m(j)$ » est, par exemple, « q », l'on peut en déduire que

$$m(i) = m(i') = m(i'') = \dots = \frac{q}{n_i}$$

(Carnap 1945a ; 2015b, p 81). C'est ainsi que, afin d'attribuer une valeur de la m -fonction régulière et symétrique « m » à chaque description d'état « i » dans L_N , il suffit d'attribuer une valeur de « m » aux différentes descriptions de structures « j », c'est-à-dire aux différentes disjonctions de descriptions d'états que l'on peut considérer comme étant isomorphes, puisque ces dernières ne sont rien d'autre que les classes d'équivalence⁹¹ dans lesquelles se répartit l'ensemble de toutes les

⁹¹ Si l'on considère un ensemble A , toute relation binaire R que l'on peut établir entre les éléments qui le constituent, et dont le champ, Q , correspond à l'ensemble des couples ordonnés d'éléments de A qui la satisfont, est appelée « relation d'équivalence » (« *equivalence relation* ») si elle remplit les conditions suivantes :

- 1) R est réflexive, c'est-à-dire $(\forall a \in A)[(a, a) \in Q]$.
- 2) R est symétrique, c'est-à-dire $(\forall a, b \in A)[(a, b) \in Q \rightarrow (b, a) \in Q]$.
- 3) R est transitive, c'est-à-dire $(\forall a, b, c \in A)[((a, b) \in Q \wedge (b, c) \in Q) \rightarrow ((a, c) \in Q)]$.

descriptions d'états, « i », de L_N . C'est ainsi que Carnap (1945a) décide d'attribuer, par convention, la même valeur de « m » aux différentes descriptions de structures d'un langage fini L_N , ce qui lui permet de définir « une m -fonction particulière » (« *one particular m -function* ») m^* , en stipulant les deux conditions suivantes : « (a) m^* est une m -fonction symétrique ; (b) m^* a la même valeur pour toutes les descriptions de structures (dans L_N) » (« *m^* is a symmetrical m -function ; (b) m^* has the same value for all structure-descriptions (in L_N)* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 81). Comme toute description d'état de L_N appartient à une seule et unique description de structure, la somme des toutes les valeurs de « m^* » pour les différentes descriptions de structures doit être égale à la somme de toutes les valeurs de « m » pour les différentes descriptions d'états, c'est-à-dire, par définition, égale à 1. Il en découle que, s'il existe « m » descriptions de structures dans L_N , pour chacune d'entre elles,

$$m^*(j) = \frac{1}{m}$$

si bien que l'on peut donner une définition de « m^* » « appliquée aux descriptions d'états dans L_N » (« *applied to the state-descriptions in L_N* »), c'est-à-dire

$$m^*(i) = \frac{1}{mn_i}$$

(Devlin 2004, p. 119). Il en découle que, pour tout élément $a \in A$, la « *classe d'équivalence de a (modulo R)* » (« *equivalence class of a (modulo R)* ») n'est rien d'autre que le sous-ensemble de A que l'on peut définir de la manière suivante :

$$|a| = \{x \in A \mid aRx\}$$

(Devlin 2004, p. 123). L'on peut démontrer, en outre, que la relation R permet de définir une partition des éléments de A en classes d'équivalences qui sont deux à deux disjointes et dont la réunion n'est rien d'autre que l'ensemble A lui-même (Devlin 2004, p. 125). Comme toute relation permettant d'établir un isomorphisme entre des ensembles donnés, tels que les descriptions d'états que définit Carnap (1945a) dans *Sur la logique inductive* – qui ne sont rien d'autre que des ensembles de signes linguistiques, disposés selon un certain ordre –, est, par définition, une relation d'équivalence, nous pouvons en conclure que les descriptions de structures dans lesquelles on peut ranger les différentes descriptions d'états qui relèvent d'un certain langage L , selon les relations d'isomorphisme qu'elles entretiennent les unes avec les autres, définissent, précisément, une partition de l'ensemble de ces mêmes descriptions d'états en classes d'équivalence.

où « i » est une description d'état quelconque dans L_N et n_i est « le nombre de descriptions d'états isomorphes à i » (« *the number of state-descriptions isomorphic to i* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 82). En conséquence, si l'on stipule que, pour tous les énoncés « k » de L_N qui ne sont pas des descriptions d'états, (a) si « k » n'est pas L-faux, la valeur de « $m^*(k)$ » est égale à la somme des valeurs « $m^*(i)$ » des descriptions d'états « i » qui appartiennent à son champ, alors que, (b) si « k » est L-faux, $m^*(k) = 0$, nous pouvons définir le degré de confirmation « c^* » qu'un énoncé, non-L-faux appartenant à L_N , « e », assigne à un énoncé du même langage, « h », de la manière suivante :

$$c^*(h, e) = \frac{m^*(e \cdot h)}{m^*(e)}$$

(Carnap 1945a ; 2015b, p. 82). Par conséquent, c'est précisément une telle fonction, « c^* », que Carnap (1945a) retient comme reconstruction rationnelle du concept de probabilité en tant que degré de confirmation, ce qui lui permet, précisément, d'apporter une réponse formelle et quantitative à la question de savoir en quoi une le résultat d'une certaine observation ou d'une certaine expérience, « e », contribue à augmenter ou à diminuer le degré de confirmation d'une hypothèse donnée, « h ».

En conséquence, c'est précisément une telle définition du concept de degré de confirmation qui permet à Carnap (1945a, 1950a) de reconstruire, par la suite, le système de la logique inductive, et donc également le principe d'induction lui-même, comme étant « la théorie de cette fonction particulière » (« *the theory of this particular function* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 82), c'est-à-dire comme étant l'étude des théorèmes que l'on peut dériver de la caractérisation de la classe des fonctions « c^* »⁹². Il s'ensuit que, afin de fournir une réponse à la question de savoir comment l'on pourrait définir de manière rigoureuse le degré auquel une certaine observation empirique permet d'augmenter ou de diminuer la confirmation d'une certaine hypothèse, même au cas où une telle hypothèse ne serait qu'incomplètement confirmable, Carnap (1945a) continue de se servir de l'approche syntaxique qu'il avait déjà utilisée pour analyser le problème de la signification empirique des énoncés scientifiques, en y introduisant des concepts sémantiques qui sont, eux aussi, de nature logico-formelle. Plus précisément, la manière dont Carnap (1945a) définit le concept de degré de confirmation dans *Sur la logique inductive* est analogue à la manière dont il définit le critère de confirmabilité simple dans *Testabilité et signification*, puisque, dans les deux cas, il construit un système de langages formels de complexité croissante dans lesquels l'on peut formuler des énoncés

⁹² Pour plus de précisions sur la manière dont Carnap (1945a, 1950a) a reconstruit la logique inductive et le principe d'induction, voir, par exemple, Hintikka (1966, 1975), Zabell (2005, 2007, 2011) et Leitgeb (2020).

atomiques, dont la forme logique ne dépend pourtant pas d'une quelconque relation directe qu'ils entretiendraient avec des faits ultimes de l'expérience, et d'où l'on peut déduire, par la suite, des énoncés synthétiques par l'intermédiaire de règles qui sont soit de nature purement syntaxique – comme dans le cas des chaînes d'introduction – soit de nature sémantique, quoique formelle. D'une part, le critère de confirmabilité simple que Carnap (1936b, 1937) définit dans *Testabilité et signification* se résume à un ensemble de contraintes formelles qui permettent de déterminer la manière dont il est possible d'introduire, dans un langage empiriste et physicaliste donné, des énoncés qui contiennent des prédicats descriptifs, à partir d'énoncés atomiques où figurent des prédicats observables ou réalisables et par l'intermédiaire de chaînes d'introduction. D'autre part, le concept de degré de confirmabilité, tel que le reconstruit Carnap (1945a) dans *Sur la logique inductive*, exprime, lui aussi, des contraintes formelles qui permettent de déterminer la manière dont il est possible d'introduire, dans tel ou tel langage formalisé, un certain énoncé « *h* », en relation à un autre énoncé « *e* », à partir des énoncés atomiques qui constituent les champs respectifs de « *h* » et de « *e* », et par l'intermédiaire de règles L-sémantiques, telles que, par exemple, les règles à partir desquelles l'on peut déduire le concept de L-implication. Nous pouvons donc en conclure que les deux reconstructions que nous venons d'analyser, à savoir la reconstruction du principe de l'empirisme et celle du principe d'induction que l'on peut trouver aussi bien dans *Testabilité et signification* que dans *Sur la logique inductive*, nous fournissent un cadre synoptique de la manière dont l'approche syntaxique de la théorie de la connaissance que défendait Carnap (1934, 1936b, 1937, 1945a) a évolué au fil du temps, dans le but d'apporter une solution au problème de la vérification empirique des énoncés dont se compose le langage-système des sciences, et donc – toujours d'après la théorie vérificationniste de la signification – de leur signification. Mais en quoi consiste donc la conception du savoir scientifique, en tant que corps de connaissances, à laquelle a abouti une telle évolution ? En quoi cette même conception du savoir scientifique aurait-elle jeté les fondements pour le développement de la conception classique des théories scientifiques ?

Sur la base des analyses que nous venons de mener, nous pouvons donc en conclure que l'approche syntaxique de la théorie de la connaissance qu'a développée Carnap (1934, 1936b, 1937, 1945a), tout au long des années 1930, a fini par se concrétiser dans une conception du système de la science unifiée comme cadre linguistique dont la fonction spécifique serait d'expliquer – dans le sens où Carnap (1945a, 1945b, 1950a) lui-même utilisait ce terme, c'est-à-dire comme synonyme de « clarifier des concepts en les redéfinissant de manière logiquement rigoureuse »⁹³ – la structure et le contenu de

⁹³ « Le problème de la probabilité [*the problem of probability*] peut être considéré comme consistant à trouver une définition adéquate du concept de probabilité [*an adequate definition of the concept of probability*] qui puisse servir de fondement à une théorie de la probabilité [*a basis for a theory of probability*]. Cette tâche ne consiste pas à définir un

telle ou telle théorie scientifique particulière. Dans une telle perspective, l'activité des philosophes « scientifiques » consisterait, ainsi, à analyser, d'un point de vue métalinguistique, la syntaxe et la sémantique d'un tel cadre, ainsi que des sous-cadres qui correspondent aux différentes théories scientifiques que l'on entend expliquer, alors que celle des scientifiques eux-mêmes consisterait, en revanche, à traduire les résultats qu'ils auront obtenus par l'observation et l'expérimentation en systèmes d'énoncés qui s'inscriront dans ce même cadre. Par « cadre linguistique », nous entendons ici un système de formules d'un langage formel donné, qui représentent, précisément, les énoncés exprimant le corps de nos connaissances scientifiques, ainsi que de règles syntaxiques et de règles sémantiques. Plus précisément, les règles syntaxiques dont il est question ici ne sont rien d'autre que des règles de formation ou de construction – qui permettent, justement, de construire les « formules bien formées » (« *well-formed formulas* ») (Enderton 2001) du langage formel que l'on a choisi –, ainsi que des règles de transformation ou d'inférence – dont la fonction est de transformer des suites de symboles du langage formel en question en d'autres suites de symboles, ainsi que de déduire de nouvelles formules à partir de celles que l'on a déjà construites, en formalisant, de cette manière, la notion intuitive de démonstration. Quant aux règles sémantiques, elles sont, en revanche, des règles qui déterminent les conditions de vérité que l'on associe à telle ou telle formule du langage formel en question, de manière que la signification des formules qui représentent des énoncés synthétiques, et qui contiennent donc des termes et des prédicats descriptifs, soit déterminable de façon empirique, et plus précisément par la réduction des prédicats descriptifs qui apparaissent dans ces mêmes énoncés aux prédicats de choses, observables ou réalisables, qui constituent la base de confirmation suffisante du langage en question. En effet, ce sont précisément de telles conditions que font en sorte que le langage formel que l'on utilise pour édifier le cadre linguistique de la science puisse être considéré comme étant empiriste et physicaliste. Comme nous l'avons vu plus haut, afin qu'on puisse considérer le système des énoncés scientifiques comme étant empiriquement fondé, il est, cependant, nécessaire que le cadre linguistique de la science, tel que nous venons de le décrire, soit étagé sur deux niveaux de constitution distincts, qui relèvent, néanmoins, d'un seul et même langage empiriste et physicaliste. Mais en quoi consistent, par conséquent, ces deux niveaux de constitution ?

nouveau concept [*'defining a new concept'*] mais plutôt à en redéfinir un ancien [*'redefining an old one'*]. Ainsi, nous avons là un problème de ce type de problèmes – souvent importants dans le développement de la science et des mathématiques – où un concept déjà en usage doit être rendu plus exact, ou, plutôt, doit être remplacé par un nouveau concept plus exact [*'a concept already in use is to be made more exact, or, rather, is to be replaced by a more exact new concept'*]. Appelons ces problèmes (d'après une adaptation de la terminologie de Kant et de Husserl) des problèmes d'explicitation [*'problems of explication'*] » (Carnap 1945b ; 2015b, p. 47).

En ce qui concerne le niveau inférieur, ce dernier consisterait dans un ensemble de formules, ou énoncés, d'une forme logique particulière, c'est-à-dire dans un ensemble d'énoncés atomiques où ne figurent que des prédicats observables ou réalisables tels que ceux que décrit Carnap (1936b, 1937) dans *Testabilité et signification*. Le niveau supérieur consisterait, au contraire, dans un ensemble d'énoncés, analytiques ou synthétiques, qui seraient de forme non atomique et qui pourraient contenir, ainsi, des prédicats descriptifs non observables ou non réalisables, mais réductibles à – ou définissable par rapport à – des prédicats d'une telle nature. Une telle structure à deux étages implique, en conséquence, l'existence d'une différence de nature formelle, et donc syntaxique, entre la partie du langage sur lequel repose le cadre linguistique des sciences que l'on peut utiliser pour construire le niveau inférieur de ce même cadre et celle dont on peut se servir pour en constituer le niveau supérieur. En outre, elle comporte également l'existence d'une distinction de nature sémantique entre les règles que l'on peut utiliser pour déterminer la signification des énoncés qui relèvent du niveau inférieur du cadre linguistique des sciences, c'est-à-dire des règles de désignation que l'on peut établir au moyen d'un nombre limité d'observations ou d'expériences et sur la base de considérations qui sont également de nature pragmatique, et celles que l'on peut utiliser pour interpréter les énoncés du niveau supérieur, c'est-à-dire des règles de transformation particulières, qui sont donc internes à ce même cadre et dont la nature est purement formelle, en ceci qu'elles ont trait aux relations logiques qui existent entre les énoncés d'un niveau et ceux de l'autre, de même que, par exemple, les L-règles sémantiques dont parle Carnap (1945a) dans *Sur la logique inductive*. C'est précisément une telle distinction syntaxico-sémantique entre deux niveaux d'un seul et même langage-système des sciences qui a permis à Carnap (1936b, 1937, 1945a) de dépasser l'un des écueils auxquels s'étaient heurtées les premières formes de vérificationnisme – telles que celle que l'on peut trouver dans le *Tractatus logico-philosophicus* ou, par certains aspects, dans *La Construction logique du monde*⁹⁴ – ou, plus

⁹⁴ « 4.05 – La réalité est comparée à la proposition » (« *Reality is compared with propositions* ») ; « 4.06 – La proposition ne peut être vraie ou fausse que dans la mesure où elle est une image de la réalité » (« *A proposition can be true or false only in virtue of being a picture of reality* ») (Wittgenstein 1922, 1993, p. 55). Comme l'explique Schmitz (2009), « dans la perspective du *Tractatus*, même si le sens d'une proposition (élémentaire ou moléculaire) devait pouvoir être ressaisie antérieurement à sa vérité et à la vérité (ou la fausseté) de toute autre proposition, ce sens n'était autre que les conditions de vérité de la proposition ; une proposition n'ayant pas de telles conditions n'a pas de sens, ce qui présuppose évidemment qu'à un moment ou à un autre, pour une proposition douée de sens, on puisse, *de fait*, en venir à constater sa vérité ou sa fausseté (sur la base éventuellement du même constat à propos des propositions élémentaires qui figurent en elle ; ce qui implique que l'on puisse *de fait* comparer les propositions élémentaires avec 'la réalité'. Même si le logicien ne peut rien dire ni quant à la forme des propositions élémentaires ni quant à ce que signifie 'comparer la réalité avec la proposition' [(Wittgenstein 1922, 4.05)], il doit, pour des raisons purement logiques, admettre qu'*il y a* des propositions élémentaires que l'on peut comparer à la réalité [(Wittgenstein 1922, 2.0211, 3.23, 5.5562)]. Transcrite en termes

généralement, ce que nous pourrions qualifier, encore une fois, d'interprétations « ontologico-épistémologiques » de l'exigence de vérifiabilité empirique, qui correspond au présupposé que, afin que l'on puisse déterminer la valeur de vérité d'un énoncé synthétique, et donc sa signification empirique, il est nécessaire de le mettre en relation avec des énoncés élémentaires, ou moléculaires, – formulés soit dans un langage des sensations, soit dans un langage des choses de la vie quotidienne – qui seraient directement comparables avec la réalité. Comme l'observe toujours François Schmitz (2009), un tel présupposé découlait d'une confusion entre

la notion (épistémologique) de confirmable et celle (logique) de vrai ; confusion qui était entretenue par l'usage de l'expression 'comparer une proposition avec la réalité' puisque cette opération de comparaison est le fait d'un homme qui, *hic et nunc*, compare, ou est en mesure de comparer, ces deux termes. Une telle opération n'est plus logique mais bien épistémologique et ne peut qu'aboutir à confirmer (aussi fermement que l'on veut) la proposition, mais pas à en ressaisir l'immuable (irrévisable) vérité (ou fausseté) (Schmitz 2009, p. 399).

Dans le cadre d'un langage empiriste et physicaliste tel que celui que décrit Carnap (1936b, 1937, 1945a) dans *Testabilité et signification*, ainsi que dans *Sur la logique inductive*, la vérité (« *Wahrheit* ») d'un énoncé est, bien au contraire, soigneusement distinguée de sa confirmation (« *Bewährung* ») (Carnap 1936c), en ceci que la première est une propriété qui est définie, une fois pour toutes, par un ensemble de règles syntaxiques et sémantiques, alors que la seconde est une propriété dont la détermination dépend des concepts pragmatiques d'observabilité et de testabilité et qui est donc sujette à des révisions incessantes, au gré de l'avancement des connaissances scientifiques et du changement des habitudes linguistiques des locuteurs. Autrement dit, dans un tel cadre linguistique, l'on peut tenir pour vrai tout énoncé qu'il est possible de dériver, en appliquant telle ou telle règle logique, à partir d'un énoncé dont on a déjà établi la vérité, alors qu'on peut considérer un certain énoncé comme ayant été confirmé, c'est-à-dire « scientifiquement accepté » (« *wissenschaftlich anerkannt* ») (Carnap 1936c), avec tel ou tel degré de confiance lorsqu'on est parvenu à le réduire à – ou à le définir par rapport à – des énoncés élémentaires et primitifs qui sont entièrement observables ou testables non pas parce qu'il serait possible de les comparer avec des faits ultimes de l'expérience, mais parce qu'ils ne contiennent que des prédicats observables ou testables, c'est-à-dire des énoncés qu'on peut considérer comme étant entièrement observables ou testables tout

vérificationnistes, cette dernière thèse conduit à admettre que les propositions scientifiques (signifiantes) doivent pouvoir être réduites à des propositions immédiatement comparables avec la réalité et dont la vérité ou la fausseté serait 'définitive'. On retrouve ainsi la thèse de l'*Aufbau* » (Schmitz 2009, p. 399).

simplement en raison d'un choix pragmatique du locuteur. Par conséquent, c'est précisément en cela que la distinction syntaxico-sémantique entre deux niveaux de constitution d'un seul et même langage empiriste et physicaliste des sciences permet de départager la notion (logique) de vérité de celle (épistémologique) de confirmabilité.

Nous pouvons donc en conclure que la vision de la science comme corps ordonné de connaissances qu'a fini par développer Carnap (1936b, 1937, 1945a), à partir de la moitié des années 1930, correspond de près à la conception classique des théories scientifiques telle que nous l'avons décrite plus haut, d'autant plus si l'on interprète cette dernière, comme le suggère Sebastian Lutz (2012), non pas en tant qu'« explication » (« *explanation* »), au sens carnapien du terme, du concept général de « théorie » (« *theory* »), mais, justement, en tant que « cadre au sein duquel il soit possible d'expliciter des théories spécifiques, telles que la théorie générale de la relativité ou la théorie de l'évolution » (« *framework in which specific theories like the general theory of relativity or evolutionary theory can be explicated* ») (Lutz 2012, p. 105). Il en découle que la conception classique des théories scientifiques peut être considérée comme étant une application particulière, à telle ou telle théorie spécifique, de la vision de la science comme cadre linguistique que nous venons de décrire et qui constitue l'aboutissement de la conception syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique – et donc, comme nous l'avons vu plus haut, de la conception syntaxique de la philosophie comme théorie de la connaissance, ainsi que de l'activité scientifique elle-même – qu'a développée Carnap (1934, 1936b, 1937, 1945a) tout au long des années 1930. De plus, nous pouvons également en conclure que le lien conceptuel, ainsi que génétique, que la conception classique des théories scientifiques entretient avec la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir comporte également l'existence d'un lien conceptuel et génétique entre la première et la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne, en tant que vision de la réalité telle qu'elle se manifeste au prisme des sciences de la nature (ou plus généralement des sciences empiriques), ainsi que des conditions de possibilité de ces mêmes sciences. Cette conclusion découle du fait que, comme nous avons argué plus haut, la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir est, elle-même, liée aux deux dogmes de l'empirisme dont parlait Quine (1951, 1953), et donc aux deux thèses fondamentales qui étayaient les présupposés mêmes de la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne. Cela dit, de quelle manière ce lien entre la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne et la conception classique des théories scientifiques nous permettrait-il de mieux comprendre en quoi cette dernière constitue, effectivement, un cadre linguistique ? Autrement dit, en quoi consistent, plus précisément, le langage formel, les règles syntaxiques et les règles sémantiques qu'elle préconise d'utiliser afin de reconstruire telle ou telle théorie et en quoi sont-ils liés à la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne ? En quoi

ces outils formels nous permettent-ils de mieux comprendre la manière dont la conception classique permet d'expliquer les théories scientifiques qui sont reconstruites à son instar, c'est-à-dire d'en mettre au jour non seulement la structure logico-syntaxique mais également la signification empirique, en marquant, par ce même biais, la distinction entre ces dernières et les théories logiques ou mathématiques ?

Chapitre 2

Des sciences formelles aux sciences empiriques ? La conception classique des théories scientifiques comme cadre métalinguistique et le problème de l'extension du programme hilbertien d'axiomatisation des mathématiques

Comme nous venons de le voir, il existe une correspondance directe, ainsi qu'un lien génétique, entre la conception de la science comme cadre linguistique à laquelle a abouti la manière dont Carnap (1928, 1932, 1934, 1936b, 1937, 1945a) envisageait la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, d'une part, et la conception classique des théories scientifiques, d'autre part. D'ailleurs, c'est précisément comme « reconstruction rationnelle » (« *rational reconstruction* »), ou logique, de la structure et des fondements empiriques de telle ou telle théorie scientifique qu'un autre membre du Cercle de Vienne, Herbert Feigl (1970), présente cette dernière dans un article qui est consacré à ce qu'il appelait, justement, la « conception orthodoxe des théories » (« *orthodox conception of theories* »). Dans ce même article, Feigl (1970) écrit, en outre, que la reconstruction rationnelle de la structure et des fondements empiriques des théories scientifiques consiste en une méthode d'analyse qui prend en examen le « contexte de la justification » (« *context of justification* ») (Reichenbach 1938) dans lequel se situe la théorie que l'on entend expliquer. Cela signifie qu'une telle méthode d'analyse vise à éclaircir la manière dont le contenu de la théorie en question peut être structuré et testé en vue d'être défendu par des argumentations rationnelles et par des preuves empiriques, contrairement à toute approche dont le but serait de « retracer les raisons historiques, la genèse et le développement psychologique, les conditions socio-politico-économiques [*'the historical origin, the psychological genesis and development, the social-political-economic conditions'*] qui déterminent l'acceptation ou le refus des théories scientifiques » (Feigl 1970, p. 4). Il s'ensuit que la fonction de la reconstruction rationnelle, comme méthode d'analyse des théories scientifiques, est triple : didactique, logique et méthodologique. Premièrement, il s'agit d'éclaircir les structures et les systèmes de confirmation qui caractérisent les différentes théories scientifiques, et cela, notamment, dans une visée didactique. Deuxièmement, il s'agit, d'une part, de juger de la « validité » (« *validity* ») des inférences déductives que l'on peut tirer à partir des principes de la théorie en question et, d'autre part, d'évaluer également l'« adéquation empirique » (« *empirical adequacy* ») de ces mêmes principes, c'est-à-dire de déterminer la mesure dans laquelle l'on peut affirmer que ces derniers ont été confirmés, ou « corroborés », (« *corroborated* ») par tel ou tel corps de preuves

observationnelles ou expérimentales, ce qui revient précisément à les soumettre à une analyse logique. Troisièmement, il s'agit d'identifier les différents postulats que contient telle ou telle théorie, en tant que composantes structurelles, afin d'en évaluer la portée empirique (Feigl 1970, p. 8), ce qui permet d'éclaircir, par conséquent, les choix méthodologiques qui ont influé sur la formulation de ces mêmes postulats. Nous pouvons donc en conclure que le lien entre la reconstruction rationnelle des théories scientifiques et leur conception classique, ou orthodoxe, qu'établit ici Feigl (1970) nous permet de mieux caractériser la façon dont cette dernière, en tant que cadre linguistique, en explique les structures et les contenus respectifs. Mais qu'est-ce qui caractérise la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre linguistique ? Autrement dit, quel choix de langage formel ou quel choix de système de règles syntaxiques et sémantiques comporte-t-elle ? Et en quoi ses caractéristiques formelles la rendent à même de remplir le rôle didactique, logique et méthodologique que Feigl (1970) attribuait à la reconstruction rationnelle des théories scientifiques ?

Comme le suggère Marion Vorms (2009, 2011), nous pouvons classer la conception classique des théories scientifiques dans une famille particulière d'approches de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique, que l'on peut qualifier d'« approches formelles » (Vorms 2009, 2011), en ceci qu'elles partagent toutes le même postulat fondamental : « on peut caractériser le contenu d'une théorie à l'aide d'outils purement formels, empruntés à la logique et aux mathématiques, [puisque] le contenu d'une théorie est ce qui est exprimé par la reconstruction formelle » (Vorms 2009, p. 187). Accepter un tel présupposé revient, en effet, à émettre l'hypothèse que, pour chaque théorie donnée, il existerait une « version », ou forme, « canonique » (« *canonical version* ») (Suppe 1977) qui en représenterait la véritable structure et le véritable contenu, par-delà les différences que l'on peut identifier entre ses formulations ou ses applications particulières, et qui en constituerait donc, pour ainsi dire, l'« essence ». C'est en cela que consiste, en effet, la condition nécessaire de la possibilité même de toute reconstruction rationnelle de la structure et du contenu d'une théorie scientifique par le biais des outils formels de la logique et des mathématiques, si bien qu'on pourrait appeler un tel présupposé « le présupposé de la reconstructibilité formelle des théories ». La raison en est que, afin de justifier l'application des différents formalismes qu'incarnent ces mêmes outils à des théories qui ont été originellement conçues sur la base d'autres formalismes, il est nécessaire de montrer en quoi les versions originaires des théories visées par la reconstruction formelle ne seraient que des variantes possibles d'une structure et d'un contenu, pour ainsi dire, « sous-jacents », que l'usage de concepts et de méthodes empruntés à la logique et aux mathématiques permettrait, justement, de saisir et de clarifier. Cela dit, les approches dont se compose une telle famille se divisent, à leur tour, en deux catégories majeures, qui correspondent à autant de manières différentes de reconstruire rationnellement et formellement les structures et les contenus des théories scientifiques, à savoir soit

comme des objets linguistiques, et notamment comme des systèmes axiomatiques de formules (d'un langage formel donné) qui représentent des énoncés, soit comme des classes de structures mathématiques, et notamment de modèles, qui sont liées les unes aux autres par des relations de similitude, justement, formelle. Mais quels sont donc les traits saillants qui distinguent les approches qui appartiennent à la première catégorie de celles qui relèvent de la seconde ? Afin de répondre à une telle question, il suffit de remarquer que les deux catégories d'approches dont il est question ici se distinguent aussi bien par leur objet, c'est-à-dire par les aspects particuliers de la structure et du contenu d'une théorie donnée qu'elles prennent en considération, que par leur forme, c'est-à-dire par les outils formels dont elles préconisent l'usage dans le but de reconstruire cette même structure et ce même contenu.

Du point de vue de leur objet, les approches qui conçoivent les théories scientifiques comme des systèmes axiomatiques sont appelées « syntaxiques » (« *syntactic* »), alors que les autres sont dites, généralement, « sémantiques » (« *semantic* ») (Mormann 2007 ; Vorms 2009, 2011 ; Winther 2015). Les premières se concentrent, en effet, sur les expressions linguistiques par lesquelles on peut traduire le contenu d'une théorie donnée afin de mettre au jour la forme logique de ces dernières, ainsi que les relations, elles aussi de nature purement logique, qu'elles entretiennent les unes avec les autres. Faire cela signifie, en conséquence, se concentrer précisément sur les propriétés syntaxiques des éléments linguistiques au moyen desquels on peut reconstruire la structure et le contenu de la théorie en question. Les secondes s'intéressent, en revanche, à la signification cognitive de telle ou telle théorie, et donc non pas à la façon dont on peut exprimer son contenu par le biais d'un certain langage formel, mais à son contenu en tant que tel (qu'il s'agisse de son contenu empirique ou de son contenu conceptuel), qu'elles considèrent, néanmoins, de manière purement formelle. Plus précisément, elles envisagent un tel contenu en termes de structures mathématiques qui sont mises en relation avec des systèmes physiques aussi bien par l'intermédiaire d'objets matériels et de procédures concrètes – tels que des protocoles et des dispositifs expérimentaux, ainsi que des instruments de mesure – que par l'intermédiaire d'autres théories et d'autres modèles – tels que des méthodes de conception d'expériences (« *design of experiments* ») et d'ajustement statistique des modèles aux données observationnelles ou expérimentales, ou encore tels que des modèles (statistiques ou déterministes) de ces mêmes données, qui comportent généralement l'adoption d'une certaine théorie de l'erreur (« *theory of errors* ») permettant de « nettoyer » les données elles-mêmes (« *data cleaning* ») (Suppes 1957, 1961, 1962, 1967, 1969, 1974, 1993, 2002 ; Przelewski 1969 ; van Fraassen 1970, 1972, 1974, 1976, 1980a, 1980b, 1989 ; Suppe 1971, 1972, 1973a, 1973b, 1973c, 1977 ; Dalla Chiara Scabia & Toraldo di Francia 1973, 1979 ; Wojcicki 1974 ; Glymour 1980 ; Thompson 1983, 1985, 1986, 1987, 1989 ; Lloyd 1984, 1988). Du point de vue de leur forme, en revanche, la différence entre les

approches syntaxiques et les approches sémantiques se traduit par le fait qu'elles incarnent autant de manières différentes de concevoir en quoi consiste la reconstruction formelle, autrement dite « formalisation » (« *formalization* »), d'une théorie donnée. Plus précisément, ces différentes approches de la formalisation se distinguent par le choix de langage formel qu'elles opèrent. Les approches syntaxiques sont, en effet, généralement associées à ce que Marion Vorms (2009, 2011) appelle la « formalisation *stricto sensu* », c'est-à-dire la formalisation des théories scientifiques en tant que reconstruction formelle de leur structure et de leur contenu dans un langage logico-symbolique dont le versant syntaxique est clairement séparé de son versant sémantique, en ceci que son vocabulaire non logique est « entièrement non interprété » (Vorms 2009, p. 191), alors que les approches sémantiques correspondent normalement à ce qu'on pourrait appeler la « formalisation *lato sensu* », c'est-à-dire la formalisation comme reconstruction formelle de la structure et du contenu d'une théorie « dans un langage qui suppose déjà définies certaines notions mathématiques, celles par exemple de la théorie des ensembles, de l'algèbre matricielle, ou de toute autre branche des mathématiques » (Vorms 2009, p. 191). Nous pouvons donc en conclure, sur la base de la présentation que nous en avons faite plus haut, que la conception classique des théories scientifiques peut être regardée comme un exemple d'approche syntaxique de la reconstruction formelle des structures et des contenus théoriques, conçue comme consistant dans la formalisation *stricto sensu* de ces mêmes structures et de ces mêmes contenus. Plus précisément, la conception classique est même considérée, généralement, comme étant l'approche syntaxique par excellence, en ceci que, d'un point de vue historique, elle a constitué le premier spécimen d'une telle catégorie (Coffa 1991 ; Friedman 1999 ; Creath 2014 ; Uebel 2014), bien que de nouvelles formes de « syntaxisme » aient émergé dans les vingt dernières années (Friedman 2001 ; Awodey 2006 ; Demopoulos 2003, 2011, 2013a ; Halvorson 2012, 2013 ; Lutz 2012, 2014 ; Van Benthem 2012). Il en découle que, afin d'étudier les caractéristiques de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre linguistique, il est nécessaire d'analyser les outils fondamentaux qu'elle préconise d'utiliser, précisément en tant qu'approche syntaxique, pour reconstruire formellement la structure et le contenu de telle ou telle théorie. Mais en quoi consistent, donc, de tels outils ?

Comme nous venons de le voir, la conception classique des théories scientifiques, en tant qu'exemple paradigmatique d'approche syntaxique de la reconstruction formelle, repose sur une vision des théories comme objets linguistiques et sur une définition du concept de formalisation que nous avons qualifiée de « *stricto sensu* ». C'est pourquoi nous pouvons la caractériser de la même manière dont Carnap (1939) et Joseph Henry Woodger (1939) définissaient le concept même de formalisation d'une théorie scientifique, c'est-à-dire, respectivement, comme « construction d'un calcul [axiomatique] complété par une interprétation » (« *the construction of a calculus supplemented*

by an interpretation ») (Carnap 1939, p. 67) et comme « construction de [la] métathéorie », dans le sens du terme que nous avons précisé dans le chapitre précédent, de la théorie en question (« *the process of constructing its metatheory* ») (Woodger 1939, p. 65). Plus précisément, Woodger (1939) identifiait trois étapes fondamentales dans la construction d'une telle métathéorie, qui consistent, respectivement, à (1) « énumérer et à élucider les signes [du langage de la théorie] qui ne sont pas définis » (« *enumerating and elucidating the undefined signs* »), à (2) « établir des règles de construction d'énoncés » (« *establishing rules of statement construction* »), ou règles de formation, et à (3) « établir des règles de transformation d'énoncés » (« *establishing rules of statement transformation* »), c'est-à-dire à définir des règles qui puissent servir de « critères objectifs [*'objective criteria'*] pour trancher la question de savoir si une certaine expression [de la théorie en question] est douée de sens [*'meaningful'*] et de savoir si un énoncé donné est une conséquence logique [*'is a consequence of'*] d'autres énoncés » (Woodger 1939, p. 65-66), auxquelles on pourrait également ajouter – afin de ne pas adhérer de manière acritique à une conception purement syntaxique de la signification et de la déduction – des règles sémantiques tels que les règles L-sémantiques dont nous avons parlé, encore une fois, dans le chapitre précédent, ou encore des règles de désignation directe. Ces définitions nous permettent ainsi de tirer deux conclusions majeures au sujet de la conception classique des théories scientifiques. Premièrement, nous pouvons en conclure que non seulement il existe une correspondance et un lien génétique entre la conception classique des théories scientifiques et la manière dont Carnap (1928, 1932, 1934, 1936a, 1936b, 1937, 1945a) envisageait la reconstruction rationnelle du savoir – c'est-à-dire une conception de la reconstruction rationnelle du savoir comme construction de cadres linguistiques –, mais il existe aussi un lien plus étroit entre les deux, en ceci que la première peut être considérée comme étant une application particulière de la seconde au cas spécifique des théories qui relèvent des sciences empiriques. En effet, c'est précisément en envisageant la conception classique des théories scientifiques comme application de la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir que nous pouvons également la caractériser, en suivant ainsi la définition du terme « formalisation » que donnait Woodger (1937), comme étant moins un cadre linguistique et théorique qu'un cadre métalinguistique et métathéorique, dont la fonction consiste à décrire les propriétés du langage formel dont on peut se servir pour reconstruire telle ou telle théorie, ainsi qu'à identifier les systèmes de règles syntaxiques ou sémantiques que l'on peut associer à ce même langage. C'est ainsi que, deuxièmement, nous pouvons également en conclure que les outils de reconstruction formelle dont la conception classique des théories scientifiques préconise l'usage, en tant que cadre métalinguistique et métathéorique, sont, précisément, l'axiomatisation, d'une part, et la construction d'un langage formel de nature particulière, d'autre part. Mais en quoi consiste donc la vision de l'axiomatisation qui est

« encastrée » (« *embedded* ») dans la conception classique des théories scientifiques ? En quoi consiste, plus concrètement, le langage formel qu'elle préconise d'utiliser ? En quoi ces deux outils formels nous permettent-ils de mieux comprendre la manière dont la conception classique permet d'expliquer les théories scientifiques qui sont reconstruites à son instar, c'est-à-dire d'en mettre au jour non seulement la structure logico-syntaxique mais également la signification empirique, en marquant, par ce même biais, la distinction entre ces dernières et les théories logiques ou mathématiques ?

Afin de répondre à ces questions, nous tracerons une généalogie de la vision de l'axiomatisation et de la formalisation qui caractérisent la conception classique des théories scientifiques. Plus précisément, nous verrons en quoi les racines d'une telle vision sont ancrées dans les controverses qui ont opposé, au début du XX^e siècle, trois positions alternatives au sujet de la nature des objets et des connaissances mathématiques, à savoir le logicisme, le formalisme et l'intuitionnisme. Pour ce faire, nous verrons, dans un premier temps (section 1), en quoi le programme logiciste, en tant que programme visant à reconstruire formellement le corps des connaissances mathématiques, sous la forme d'un système axiomatique, en réduisant les concepts mathématiques à des concepts logiques, a fini par soulever une problématique logico-linguistique et une problématique ontologico-épistémologique. Plus précisément, la première de ces problématiques tient à la question de savoir en quoi devrait consister la structure d'un langage formel qui permettrait de reconstruire les fondements des mathématiques et quels sont les axiomes que l'on serait justifié de mettre au fondement d'une telle structure, alors que l'autre problématique concerne la question de savoir quelles seraient les entités et les propriétés abstraites qui pourraient constituer l'ontologie que nécessite la reconstruction des fondements des mathématiques. C'est pourquoi, dans un second moment (section 2), nous nous interrogerons sur la manière dont l'intuitionnisme et le formalisme, toujours en tant que programmes de reconstruction des mathématiques, ont essayé d'apporter une réponse à de telles questions. En particulier, nous verrons en quoi l'école formaliste liée au mathématicien David Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) a effectué une synthèse entre le logicisme et l'intuitionnisme, qui consistait à reconstruire le corps des mathématiques classiques sous la forme d'un système axiomatique formulé dans un langage logico-symbolique, tout en maintenant que ce même système ne pouvait pas être interprété en termes purement logiques, en ceci qu'il devait faire l'objet d'une métathéorie, justement, mathématique, mais finitiste. Une telle synthèse a cependant fini par soulever deux problèmes ultérieurs : d'une part, le problème de l'élaboration d'un formalisme qui s'applique à la totalité du corps des connaissances mathématiques et qui prenne la forme d'un langage-système permettant aux mathématiciens d'exploiter la puissance et la portée inférentielle des principes transfinis, tels que le principe mathématique de l'induction transfinie ou le principe logique du tiers exclu, tout en évitant

de tomber dans des paradoxes ; d'autre part, le problème de la possibilité d'étendre la démarche axiomatique, telle que l'envisageait Hilbert (1899, 1901, 1905) lui-même, aux sciences empiriques, sans pour autant réduire ces dernières à leurs composantes logico-mathématiques.

En conséquence, comme nous le verrons dans un troisième et dernier moment (section 3), c'est précisément à partir de ces deux problématiques que s'est développée la conception classique des théories scientifiques en tant que conception « orthodoxe » des théories qui était propre au courant de l'empirisme logique. Plus précisément, nous verrons en quoi Rudolf Carnap (1939) a tâché de résoudre le premier problème que l'école hilbertienne avait légué à l'empirisme logique en dissolvant, pour ainsi dire, « dialectiquement » l'opposition entre logicistes, formalistes et intuitionnistes. Pour ce faire, Carnap (1939) a développé une conception des mathématiques, reconstruites sous la forme d'un système axiomatique, non pas comme système d'informations, mais comme simple outil pour effectuer des déductions dans le domaine des sciences empiriques. Pour ce faire, Carnap (1934, 1939, 1950b) s'appuyait, notamment, sur deux principes métalinguistiques, c'est-à-dire un principe de « tolérance syntaxique » et un principe de « tolérance sémantique ». Le premier principe affirme, en effet, qu'il faut éviter d'imposer toute contrainte a priori au choix de tel ou tel formalisme, alors que le second affirme que l'introduction de tel ou tel terme dans un cadre linguistique donné soulève des questions qui sont de nature linguistique (c'est-à-dire sémantique et pragmatique), et non pas de nature théorique ou cognitive. C'est précisément par l'intermédiaire de ces mêmes principes que Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a tâché, par la suite, de résoudre également l'autre problème que le programme formaliste avait légué à l'empirisme logique, c'est-à-dire le problème de l'interprétation empiriques des théories scientifiques, reconstruites sous la forme de systèmes axiomatiques dont le vocabulaire descriptif serait, a priori, dépourvu de toute signification logique ou empirique. Ce faisant, il visait à dissoudre l'opposition métaphysique et métascientifique entre une conception réaliste des termes abstraits qui figurent dans les théories scientifiques, comme termes dénotant des entités physiquement existantes, et une conception instrumentaliste de ces mêmes termes, comme simples outils pour la description et la déduction de phénomènes empiriques. Nous verrons ainsi en quoi cela a amené Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) à développer une conception de l'interprétation des calculs qui sont censés reconstruire les théories qui relèvent des sciences empiriques comme interprétation partielle du langage dans lequel ces mêmes calculs sont formulés, en ceci que ce dernier se composerait de deux sous-langages distincts, à savoir un langage d'observation et un langage théorique. La distinction entre ces deux langages consisterait, plus précisément, en ceci que le premier serait interprété de manière directe et complète, alors que l'autre serait interprété de manière, justement, indirecte, c'est-à-dire en fonction de la structure globale du système théorique dans lequel

il s'inscrit. En conséquence, c'est précisément en ceci qu'elle préconise d'utiliser deux sous-langages qui sont caractérisés d'une telle manière qu'il est possible de considérer la conception classique des théories scientifiques non seulement comme étant une réponse au second problème que le programme logiciste avait légué à l'empirisme logique, mais également comme étant une façon d'explicitier la structure et le contenu des théories qui sont reconstruites à son instar. La raison en est que la conception classique permet d'explicitier non seulement la structure logico-syntaxique de ces mêmes théories, mais également leur signification empirique, c'est-à-dire ce qui les distingue des théories logico-mathématiques. Une telle conclusion soulève, cependant, une question ultérieure, c'est-à-dire la question de savoir en quoi l'on pourrait considérer la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre métathéorique et métalinguistique, comme étant, en même temps, un cadre conceptuel. En d'autres termes, dans quel sens pourrait-on affirmer qu'elle impose des contraintes de nature ontologique, épistémologique ou cognitive aux théories qui sont reconstruites à son instar ?

2.1 Quel langage et quelle ontologie sont-ils nécessaires pour refonder les mathématiques ? Les *Principia Mathematica* et les questions ouvertes du logicisme

Comme le rappelle Marion Vorms (2009, 2011), par « axiomatisation », l'on entend généralement

la présentation d'une théorie sous la forme d'un système déductif organisé de telle sorte que la totalité de son contenu soit comprise dans un ensemble déterminé d'énoncés qui sont les axiomes de la théorie. Les conséquences logiques des axiomes sont les théorèmes de la théorie. On appelle 'clôture déductive' l'ensemble des conséquences déductives de la théorie (Vorms 2009, p. 191).

L'axiomatisation constitue, par conséquent, un outil de reconstruction formelle des théories scientifiques qui est compatible aussi bien avec la formalisation *stricto sensu* qu'avec la formalisation au sens large du terme, quoiqu'elle soit plus étroitement associée à la première, et donc aux approches syntaxiques de la structure et du contenu des théories scientifiques, en général, et à la conception classique, en particulier⁹⁵. Quant à l'autre outil dont la conception classique des théories scientifiques préconise l'usage, il s'agit justement de construire un langage formel, *L*, qui relève, généralement, de la logique des prédicats du premier ordre, mais qui peut également relever d'une logique d'ordre

⁹⁵ Pour une discussion critique des rapports entre formalisation et axiomatisation en ce qui concerne la conception classique des théories scientifiques, voir Lutz (2012).

supérieur⁹⁶, dont les termes appartiennent à un certain vocabulaire, V^{97} – c’est-à-dire à un ensemble de signes de constantes logiques, de signes de constantes descriptives, et donc non logiques, ou de signes de variables, qui peuvent être utilisés pour construire les formules dudit langage –, et qui est associé à un certain calcul formel, K – c’est-à-dire à un ensemble de règles de transformation ou de déduction au moyen desquelles les énoncés de la théorie en question peuvent être manipulés comme s’il s’agissait, justement, de simples séquences de signes⁹⁸. Un tel langage se caractérise par le fait

⁹⁶ Comme le remarque Lutz (2012), l’idée reçue que la conception classique des théories scientifiques n’admettrait que des langages formels relevant de la logique des prédicats du premier ordre découle d’une identification abusive de cette dernière avec ce que Patrick Suppes (1970, 2000) appelait le « schéma traditionnel des théories scientifiques » (« *traditional sketch of scientific theories* »). Il s’agit d’une équivoque qu’ont entretenue même les analyses critiques les plus aiguës de la conception classique des théories scientifiques, telles que celle qu’en a faite Frederick Suppe (1977).

⁹⁷ Plus précisément, le vocabulaire, V , d’un langage de la logique des prédicats du premier ordre, L , se compose de « symboles logiques » (« *logical symbols* ») [tels que les parenthèses : « (,) » ; des symboles de connecteurs logiques : « \rightarrow » (« implication »), « \neg » (« négation ») ; des variables, une pour chaque entier naturel n : « v_1 », « v_2 »,... ; le symbole d’égalité (qui est pourtant dispensable) : « = »] et de « paramètres » (« *parameters* ») [tels que le symbole du quantificateur universel : « \forall » ; des symboles de prédicats : pour chaque entier naturel n , un ensemble (même vide) de symboles, appelés symboles de prédicats à n places (« $P(*)$ », « $Q(*,*)$ »,...)] ; des symboles de constantes : un ensemble (même vide) de symboles ; des symboles de fonctions : pour chaque entier naturel n , un ensemble (même vide) de symboles, appelés symboles de fonctions à n places (« $\varphi(*)$ », « $\psi(*,*)$ »,...)] (Enderton 2001, p. 69-70). Alors que les premiers sont communs à tous les langages de la logique des prédicats du premier ordre (sauf le symbole d’égalité « = »), les seconds sont spécifiques à tel ou tel langage. Le langage de premier ordre qui est utilisé pour formaliser l’arithmétique élémentaire inclue, par exemple, le symbole d’égalité, le symbole de prédicat à deux places « $<$ », le symbole de constante « 0 », le symbole de fonction à une place « S » (pour la fonction « successeur ») et les symboles de fonction à deux places « $+$ » (pour l’addition), « \cdot » (pour la multiplication), et « E » (pour la fonction « puissance ») (Enderton 2001, p. 70-71).

⁹⁸ Au cours de la formalisation, tout énoncé de la théorie est remplacé par une expression du langage logique en question, c’est-à-dire par une « séquence finie de symboles » (« *any finite sequence of symbols* ») (Enderton 2001, p. 73-74). Plus précisément, il s’agit de formules bien formées, c’est-à-dire de formules qu’il est possible de construire en respectant les règles syntaxiques du langage en question, et auxquelles l’on peut donc attribuer, éventuellement, une signification. Parmi les différentes expressions d’un langage donné, l’on distingue les « termes » (« *terms* »), c’est-à-dire toutes les expressions que l’on peut construire en appliquant des signes de fonctions à des signes de constantes ou des variables et que l’on peut interpréter comme désignant un objet, les « formules atomiques » (« *atomic formulas* »), c’est-à-dire les formules que l’on peut obtenir en assemblant des termes de manière correcte – c’est-à-dire en respectant les règles de formation des formules bien formées – sans avoir recours à aucun symbole de connecteur ou de quantificateur, les « formules bien formées » (« *well-formed formulas* »), qui sont les expressions que l’on peut construire en assemblant des formules atomiques par le biais de connecteurs et de quantificateurs, et les « variables libres » (« *free variables* »), que l’on peut définir par récurrence sur l’ensemble des autres formules (Enderton 2001, p. 74-76). Un « calcul logique » (« *logical calculus* ») – ou calcul déductif – se définit, en revanche, comme étant un ensemble (fini ou infini) Λ de formules bien formées du langage en question, qui tiennent lieu d’axiomes, auquel on associe un ou plusieurs règles d’inférence

que, d'après la définition même du concept de formalisation *stricto sensu* que nous avons donné plus haut, sa structure logico-syntaxique, c'est-à-dire le vocabulaire V et le calcul K , est indépendante de toute interprétation sémantique. Cela signifie qu'il est possible de déterminer une telle structure sans fixer d'emblée aucun « *domaine d'objets* » qui constituerait « l'univers du discours » (« *universe of discourse* ») (Boole 1854) du langage en question, c'est-à-dire sans assigner « des référents aux termes non logiques » du vocabulaire V , et, par conséquent, sans assigner aucune « valeur de vérité aux énoncés » du langage en question (Vorms 2009, p. 190). Il s'ensuit que l'axiomatisation et la construction d'un langage non interprété constituent deux outils parfaitement complémentaires, en ceci que, afin de formuler un système d'énoncés dans un langage de cette nature, il suffit d'échafauder une structure logico-syntaxique, par exemple, justement, sous la forme d'un système déductif axiomatique. Néanmoins, si l'édification de telles structures peut suffire à la reconstruction formelle des théories logico-mathématiques, il n'en est pas de même pour les théories qui relèvent des sciences empiriques. Comme le rappelait Carnap (1966) lui-même, les théories logico-mathématiques sont telles dans un sens « purement analytique » (« *purely analytic* ») du terme, c'est-à-dire, justement, en tant que « système déductif dépourvu de toute référence au monde réel » (« *deductive system that makes no reference to the actual world* »). Contrairement à ces dernières, « des théories empiriques [*empirical theories*'] comme la théorie de la relativité, la théorie des quanta, la théorie psychanalytique ou la théorie économique de Keynes » ne peuvent pas se permettre le même niveau d'« isolement...par rapport au monde » (« *isolation from the world* ») (Carnap 1966, p. 231), en ceci que leur but consiste précisément, comme l'observait encore une fois Quine (1957), à guider les scientifiques dans leur quête de preuves observationnelles et expérimentales, en leur donnant les moyens de formuler des explications ou des prédictions⁹⁹. Il en découle que la reconstruction formelle

qui permettent d'obtenir d'autres formules bien formées. Il en découle que, si Γ est un autre ensemble de formules, « les théorèmes [*theorems*'] de Γ seront les formules que l'on peut obtenir à partir de $\Gamma \cup \Delta$ [l'ensemble des formules qui appartient à Γ ou à Δ] en utilisant [les règles d'inférence] (un nombre fini de fois). Si φ est un théorème de Γ (s'écrit $\Gamma \vdash \varphi$), alors une séquence de formules [*a sequence of formulas*'] qui trace [*records*'] ...la manière dont φ a été obtenu à partir de $\Gamma \cup \Delta$ au moyen [des règles d'inférence] s'appellera une déduction de φ à partir de Γ » (Enderton 2001, p. 110).

⁹⁹ « Brièvement énoncée, notre dernière question était : comment la science fait-elle pour mieux réussir que le sens commun ? [*how science gets ahead of common sense*'] La réponse en un mot est 'système' [*system*']. Le savant introduit le système dans sa quête et son examen des preuves empiriques [*his quest and scrutiny of evidence*']. C'est aussi le système, qui dicte au savant ses hypothèses [*System, moreover, dictates the scientist's hypotheses themselves*'] : les mieux reçues sont celles dont on considère qu'elles introduisent le plus de simplicité dans la théorie globale [*conduce most to simplicity in the overall theory*']. Une fois que des prédictions [*predictions*'] ont été déduites des hypothèses, elles sont à leur tour soumises à la discipline des preuves empiriques. Mais les hypothèses, durant leur existence d'hypothèse [*at the time of hypothesis*'], n'ont pour toute recommandation en leur faveur que des considérations de

des théories empiriques doit également identifier des règles permettant de projeter la structure logico-syntaxique qui caractérise telle ou telle théorie dans l'univers du discours que l'on souhaite y associer, c'est-à-dire, en dernière instance, dans un certain domaine empirique que la théorie en question est censée décrire ou expliquer. Mais en quoi consistent, par conséquent, de telles règles, d'après la conception classique des théories scientifiques ?

La thèse que nous défendons ici est que, afin de répondre à cette autre question, il est nécessaire d'identifier deux parties constituantes de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre métalinguistique et métathéorique, qui sont parfaitement complémentaire l'une à l'autre, à savoir, d'une part, une métathéorie syntaxique qui a trait à la reconstruction de la structure et du contenu conceptuel de telle ou telle théorie empirique sous la forme d'un système déductif axiomatique, formulé dans un langage dont les termes descriptifs sont, à priori, dépourvus de toute interprétation, et, d'autre part, une métathéorie sémantique dont le but consiste, précisément, à rendre compte de la manière dont il est possible de fournir une interprétation empirique à une telle structure logico-syntaxique. Sur la base de ce présupposé, nous pouvons donc en conclure que l'axiomatisation et la construction d'un langage formel non interprété constituent les présupposés fondamentaux du volet syntaxique de la conception classique des théories scientifiques. Mais en quoi consistent, par conséquent, les présupposés fondamentaux de son volet sémantique ? Afin de répondre à une telle question, il est cependant nécessaire de s'interroger sur les liens qui existent entre ces deux volets d'un seul et même cadre métalinguistique et métathéorique, car c'est précisément l'articulation entre ces deux volets qui permet de rendre compte de ce qui caractérise les théories qui relèvent des sciences empiriques de celles qui relèvent des sciences formelles, c'est-à-dire des rapports que les premières entretiennent avec l'expérience empirique et le monde physique. Cela comporte, cependant, de mieux caractériser la structure de la conception classique des théories scientifiques, en commençant par celle de son versant syntaxique, dont les racines conceptuelles sont ancrées, d'un point de vue historico-génétique, dans le programme d'axiomatisation des sciences mathématiques, conçus, justement, comme systèmes déductifs non interprétés, inauguré par le mathématicien allemand David Hilbert (1899, 1901) et développé par les membres de l'école qui finit par se rassembler autour de sa personne, à l'Université de Göttingen. Ce dernier se prolongeait, en effet, de manière naturelle dans un programme de reconstruction axiomatique non seulement des sciences mathématiques, mais également des sciences naturelles, et notamment des pans les plus mathématisés des sciences physiques, si bien que d'aucuns, tels que, par exemple, Thomas Mormann (2017), ont pu déceler dans

simplicité systématique [*only the considerations of systematic simplicity*']. Dans cette mesure, la simplicité elle-même (en un certain sens et malgré la difficulté du terme) fait partie des preuves » (Quine 1957 ; Jacob 1980b, p. 225-226).

un tel prolongement du programme hilbertien les prémices de la conception classique des théories scientifiques. Cela dit, en quoi une telle thèse est-elle effectivement justifiable ? En d'autres termes, en quoi pourrait-on affirmer que la conception classique des théories scientifiques, du moins en ce qui concerne son volet syntaxique, aurait constitué une manière de prolonger l'approche hilbertienne de l'axiomatisation dans le domaine des sciences physiques, et plus généralement des sciences empiriques ? Afin d'apporter une solution à cette autre problématique, il est, néanmoins, nécessaire d'analyser les rapports qui liaient l'approche hilbertienne de l'axiomatisation à une autre des sources auxquelles puisait la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne, c'est-à-dire le programme de reconstruction des fondements des mathématiques, dit « logiciste » (Jacob 1980a ; Ouelbani 2006 ; Soulez *et al.* 2010), que l'on associe aux noms de Gottlob Frege (1879), Alfred North Whitehead, Bertrand Russell (1910, 1912, 1913) et, du moins en partie, Ludwig Wittgenstein (1922). En quoi consistaient, par conséquent, ces liens ? Et quels sont les problèmes logiques et philosophiques autour desquels se sont opposés le programme hilbertien d'axiomatisation des sciences mathématiques et des sciences naturelles, d'une part, et le programme logiciste, d'autre part ?

Afin de répondre à ces questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.1.1), en quoi le programme logiciste s'inscrivait dans une tentative de reconstruire le corps des connaissances mathématiques sur la base de l'arithmétique, conçue comme une science des nombres qui était à la fois analytique et *a priori*, c'est-à-dire comme étant une science qui reposait sur des principes logiques fondamentaux et dont les vérités étaient indépendantes de toute intuition spatiale et temporelle. Pour ce faire, les logicistes s'appuyaient sur deux thèses fondamentales, l'une de nature syntaxique et l'autre de nature sémantique, à savoir la thèse qu'il était nécessaire d'interpréter tous les concepts des mathématiques, y compris ceux que les mathématiciens eux-mêmes considéraient comme étant primitifs, en fonction de concepts logiques, et la thèse que, dans un tel but, il était également nécessaire de se servir d'un langage logiquement parfait, tel que l'« idéographie » (« *Begriffsschrift* ») de Gottlob Frege (1879). Plus précisément, ces deux thèses se sont concrétisées dans la démarche par laquelle Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1910, 1912, 1913) ont essayé de réduire le concept de nombre naturel au concept logique de classe, si bien que nous pouvons en conclure que c'est précisément dans l'effort de mettre en pratique ces dernières que les logicistes ont fini par se heurter aux paradoxes qui étaient liés au développement du système des nombres transfinis, introduit par Georg Cantor (1883), et qui portaient, précisément, sur quelques aspects fondamentaux du concept logique de classe, et plus précisément sur la notion de totalité illégitime, c'est-à-dire de classe qui contient au moins un élément qui présuppose l'existence de l'ensemble auquel il appartient, en tant que totalité déjà constituée. C'est pourquoi, dans un second moment

(section 2.1.2), nous verrons également en quoi Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont tâché de résoudre de tels paradoxes en traduisant les deux thèses caractéristiques du programme logiciste dans une théorie des types logiques, dite « ramifiée » (« *ramified theory of logical types* »), qui représente la structure logique du langage-système des *Principia Mathematica* en tant que langage logiquement parfait, c'est-à-dire en tant que langage qui permet d'éliminer toute ambiguïté dans l'usage des signes logiques, et notamment toute ambiguïté liée aux totalités illégitimes. Nous verrons, en outre, en quoi Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont formulé, toujours dans le but d'approfondir les thèses fondamentales du logicisme et de résoudre les paradoxes cantorien, un certain nombre d'axiomes, tels que l'« axiome de réductibilité » (« *axiom of reducibility* »), qui constituent, justement, des principes logiques permettant d'interpréter les concepts mathématiques de manière purement logique, c'est-à-dire en les réduisant à des extensions de fonctions propositionnelles de nature prédicative, et donc à des prédicats. Cela dit, ce sont précisément la structure de la théorie des types et l'axiome de réductibilité qui ont fini par mettre en évidence les faiblesses du système des *Principia Mathematica*, que l'on peut exprimer sous la forme de deux questions ouvertes, l'une de nature logico-linguistique et l'autre de nature ontologico-épistémologique. Premièrement, quel type de langage formel et quel genre d'axiomes faudrait-il établir pour reconstruire les fondements des mathématiques ? Deuxièmement, en quoi consistent les entités conceptuelles dont il serait nécessaire de supposer l'existence, toujours dans le but de reconstruire les fondements des mathématiques, et de quelle manière pourrait-on espérer connaître les propriétés qui caractérisent ces mêmes entités ?

2.1.1 Jusqu'à quel point peut-on concevoir les mathématiques comme étant des sciences analytiques *a priori* ? Le programme logiciste et les paradoxes de la théorie des ensembles

Quoiqu'elle ait joué un rôle fondamental dans le développement des mathématiques anciennes (Heath 1921 ; Hintikka *et al.* 1981 ; Netz 1999, Christianidis 2004), si bien que A. C. Crombie (1994, 1995) a pu appeler « postulation » (« *postulation* ») le « style de pensée scientifique » (« *style of scientific thinking* ») qu'il estimait avoir caractérisé les sciences grecques, l'axiomatisation moderne a pris son essor au tout début du XX^e siècle, et cela précisément à la suite du programme d'axiomatisation de l'arithmétique, de l'analyse et de la théorie des ensembles, qui comportait également la quête d'une preuve de la cohérence interne des systèmes axiomatiques ainsi construits, développé par Hilbert (1899, 1901) et par les membres de l'école qui se constitua autour de sa personne (Detlefsen 1993a, 1993b, 1996, 2013 ; Mancosu 1998, 2010 ; Zach 2019). En s'inspirant des tentatives d'axiomatisation des principes fondamentaux de la géométrie et de l'arithmétique

qu'avaient menées d'autres mathématiciens, tels que Moritz Pasch (1882) et Giuseppe Peano (1889), dans le but de répondre aux questionnements sur les fondements des mathématiques suscités par le développement des géométries non euclidiennes (Corry 1993 ; Suppes 2002), Hilbert (1899) entreprit, en effet, « un nouvel essai de constituer, pour la géométrie, un système complet d'axiomes aussi simples que possible [*ein vollständiges und möglichst einfaches System von Axiomen*'] et d'en déduire les théorèmes les plus importants, de façon à mettre en évidence le rôle des divers groupes d'axiomes [*die Bedeutung der verschiedenen Axiomgruppen*'] et la portée [*die Tragweite*'] de chacun d'eux » (Hilbert 1899 ; 1971, p. 10). Par le terme « axiomes », Hilbert (1899) entendait, notamment, un petit nombre de propositions fondamentales d'où l'on pourrait déduire l'ensemble des théorèmes de la géométrie, aussi bien dans sa formulation euclidienne que dans ses formulations non euclidiennes. Contrairement à celle d'Euclide, l'axiomatisation de la géométrie qu'a proposée Hilbert (1899) ne se fonde, cependant, pas sur la distinction entre « définitions » (« ὁροί »), « postulats » (« αἰτήματα ») et « notions communes », (« κοινὰ ἔννοιαι »), c'est-à-dire, respectivement, entre (1) des énoncés qui servent à introduire les termes primitifs dénotant les entités dont la théorie postule l'existence, à déterminer les conditions dans lesquelles une certaine propriété s'applique à un certain objet ou à étendre le lexique de la théorie elle-même, (2) des énoncés qui tiennent lieu de présupposés spécifiques à une théorie donnée et dont on postule la vérité sans la montrer explicitement, ainsi que (3) des énoncés qui constituent des présupposés fondamentaux, dont la vérité est tenue pour évidente, et que l'on regarde comme étant communs à l'ensemble des sciences, tels que, par exemple, les principes fondamentaux de la logique (« Des choses qui sont égales à la même chose sont égales entre elles aussi », « Le tout est plus grand que chacune de ses parties », etc.) (Heath 1921 ; Torretti 1978 ; Netz 1999)¹⁰⁰. Elle admet, en revanche, un certain nombre de notions primitives dénotant soit « différents systèmes de choses » (« verschiedene Systeme von Dingen ») – comme les « points » (« Punkte »), les « droites » (« Geraden ») et les « plans » (« Ebenen ») – soit des relations élémentaires qui sont supposées exister entre les éléments de ces mêmes systèmes – telles que les relations que dénotent les termes « entre » (« liegen »), « être sur » (« zwischen ») ou « congruent » (« kongruent ») – et qui sont définies, de manière implicite, par les axiomes de la géométrie eux-mêmes. Hilbert (1899) a, d'ailleurs, subdivisé de tels axiomes en cinq groupes : les « axiomes

¹⁰⁰ Comme le souligne Heath (1921), l'on retrouve une distinction similaire déjà chez Aristote, et notamment dans les *Seconds Analytiques* : « Toute science démonstrative [*ἀποδεικτικὴ ἐπιστήμη*], en effet, tourne autour de trois choses [*περὶ τρία*'] : les choses dont on pose qu'elles sont (elles constituent le genre dont la science examine les propriétés qui sont par soi), ce qu'on appelle les axiomes communs [*τὰ κοινὰ λεγόμενα ἀξιώματα*'], notions premières à partir desquelles on démontre [*ἐξ ὧν πρῶτων ἀποδείκνυσι*], et, troisièmement, les propriétés, dont on admet ce que chacune signifie [*τὰ πάθη, ὧν τί σημαίνει ἕκαστον λαμβάνει*'] ». (Aristote, *Seconds Analytiques*, I, 10, 76b 10-15 ; Pellegrin (2014), p. 381).

d'appartenance » (« *Verknüpfungssaxiome* »), les « axiomes d'ordre » (« *Anordnungsaxiome* »), les « axiomes de congruence » (« *Kongruenzaxiome* »), l'« axiome des parallèles » (« *Parallelenaxiom* »), c'est-à-dire l'« axiome d'Euclide » (« *Euklidisches Axiom* »)¹⁰¹, et les « axiomes de continuité » (« *Stetigkeitsaxiome* ») (Hilbert 1899 ; 1971, p. 10).

Il en découle que les axiomes de Hilbert (1899) diffèrent des axiomes d'Euclide en ceci qu'ils se limitent à énoncer le fait que les entités fondamentales dont on postule l'existence en géométrie entretiennent telle ou telle relation les unes avec les autres, si bien que leur validité est restreinte aux rapports entre les systèmes de choses en question. D'autre part, ces mêmes axiomes ne correspondent, cependant, pas non plus aux postulats euclidiens, car leur signification est, à priori, tout à fait indéterminée, tout comme celle des notions primitives qu'ils contiennent. Autrement dit, quoique les termes « point », « droite » et « plan » puissent bien apparaître dans les axiomes de la géométrie hilbertienne, ainsi que dans les théorèmes que l'on peut en déduire, il serait erroné de leur attribuer, de manière dogmatique, la signification intuitive que l'on attache à ces mêmes termes dans la langue de la « vie quotidienne », pour ainsi dire¹⁰². Ce qui en définit la signification, ce sont, en effet, les relations que les entités qu'ils dénotent entretiennent les unes avec les autres et qui sont déterminées, à leur tour, par les axiomes mêmes de la géométrie hilbertienne. Il en découle que de tels axiomes tiennent lieu de définitions implicites non seulement des relations qui constituent l'échafaudage du système axiomatique en question, mais également des objets dont ils postulent l'existence, c'est-à-dire de la signification même des termes qu'ils permettent d'introduire, quoique seulement de manière indirecte. Autrement dit, contrairement non seulement à l'axiomatique classique d'Euclide, mais également à l'axiomatique moderne de Dedekind-Peano, qui sont de nature contentuelle, celle de Hilbert est purement formelle, en ceci qu'elle décrit des complexes de relations qui sont, justement, purement formelles, et non pas « une réalité abstraite ou concrète plus ou moins idéalisée », que l'on pourrait connaître grâce à l'apport d'expériences empiriques ou d'expériences de pensée (Largeault 1992, p. 7 n1). Par ailleurs, bien qu'il ait écrit, dans un article postérieur, que « pour étudier un domaine partiel d'une science, on le fait reposer sur un nombre le plus restreint possible de principes les plus simples, les plus intuitifs, les plus aisés à concevoir possible [*eine möglichst geringe Anzahl*

¹⁰¹ « Soient une droite a et un point A extérieur à a ; dans le plan déterminé par a et A , il existe au plus une droite qui passe par A et qui ne coupe pas a » (« *Es sei a eine beliebige Gerade und A ein Punkt außerhalb a : dann gibt es in der durch a und A bestimmten Ebene höchstens eine Gerade, die durch A läuft und a nicht schneidet* ») (Hilbert 1899 ; 1971, p. 39).

¹⁰² D'après une anecdote que relate, entre autres, le groupe Nicolas Bourbaki (1984), « Hilbert exprimait volontiers cette idée en disant que l'on pouvait remplacer les mots 'point', 'droite' et 'plan' par 'table', 'chaise' et 'verre à bière' sans rien changer à la géométrie » (Bourbaki 1984, p. 34).

von möglichst einfachen, anschaulichen und faßlichen Prinzipien'] » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 115), Hilbert (1899) ne fixait aucune limite à priori quant au choix des énoncés que l'on pouvait tenir pour axiomes de tel ou tel système¹⁰³. Il estimait, néanmoins, nécessaire de toujours analyser les axiomes choisis afin d'en vérifier la « portée » (c'est-à-dire le nombre et la nature des théorèmes qu'il serait possible d'en déduire) (« *Tragweite* »), la « cohérence », ou « consistance » (« *Widerspruchsfreiheit* »), et l'« indépendance » (« *Unabhängigkeit* »)¹⁰⁴. C'est en procédant de telle manière que Hilbert (1899) a réussi à formuler un cadre formel exhaustif pour l'ensemble de la géométrie et à en déduire quelques théorèmes fondamentaux, comme, par exemple, le théorème de Pascal¹⁰⁵ et le théorème de Desargues¹⁰⁶. De cette manière, il parvint également à la conclusion qu'il était nécessaire d'étendre la méthode axiomatique à d'autres domaines des sciences mathématiques

¹⁰³ « Ce faisant, rien n'empêche de choisir pour axiomes des propositions démontrables ou dont on a la conviction qu'elles le sont [*'beweisbare oder unserer Überzeugung nach beweisbare Sätze'*]. L'histoire montre même que ce choix est parfois très favorable : des exemples en sont le postulat de Legendre sur les nombres premiers en théorie des restes quadratiques [*'LEGENDREs Primzahlpostulat in der Theorie der quadratischen Reste,'*], la conjecture de Riemann sur les zéros de [la fonction] $\zeta(s)$ [*'RIEMANNs Vermutung über die Nullstellen von $\zeta(s)$ '*], le théorème de l'existence des racines en algèbre [*'der Wurzelexistenzsatz in der Algebra'*], enfin la dite hypothèse ergodique [*'die sogenannte Ergodenhypothese'*], proposition de mathématique dont la démonstration échappe toujours, et qui pourtant est devenue la base de la mécanique statistique [*'Grundlage für die statistische Mechanik'*] » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 115).

¹⁰⁴ Ce fut précisément en démontrant l'indépendance de l'axiome (IV), c'est-à-dire l'axiome des parallèles, que Hilbert (1899) parvint à inclure les géométries non euclidiennes dans son propre système : « Dans la géométrie ordinaire (cartésienne) [*'in... (Cartesischen) Geometrie'*]..., choisissons les points, droites et plans [*'Punkte, Geraden und Ebenen'*] contenus à l'intérieur d'une sphère [*'innerhalb einer festen Kugel'*] comme éléments d'une géométrie de l'espace [*'Elemente einer räumlichen Geometrie'*]; introduisons la congruence des transformations linéaires [*'die Kongruenzen dieser Geometrie durch solche linearen Transformationen der gewöhnlichen Geometrie'*] qui conservent la sphère choisie. En introduisant quelques conventions appropriées [*'bei geeigneten Festsetzungen'*], on reconnaît que dans cette géométrie non euclidienne, tous les axiomes sont valables à l'exception de l'axiome d'Euclide (IV) ; la non-contradiction de la géométrie ordinaire [*'die Möglichkeit der gewöhnlichen Geometrie'*] ...implique celle de la géométrie non euclidienne [*'die Möglichkeit der Nicht-Euklidischen Geometrie'*] » (Hilbert 1899 ; 1971, p. 56-57).

¹⁰⁵ « Soient A, B, C et A', B', C' , deux groupes de trois points appartenant respectivement à deux droites concourantes et tous différents de l'intersection de ces droites ; si CB' est parallèle à BC' et CA' parallèle à AC' , BA' est parallèle à AB' » (« *Es seien A, B, C bzw. A', B', C' je drei Punkte auf zwei sich schneidenden Geraden, die vom Schnittpunkte der Geraden verschieden sind; ist dann CB' parallel BC' und CA' parallel AC' , so ist auch BA' parallel AB'* ») (Hilbert 1899 ; 1971, p. 77).

¹⁰⁶ « Si dans deux triangles coplanaires les côtés homologues sont parallèles deux à deux, les droites déterminées par les sommets homologues sont concourantes ou parallèles et réciproquement » (« *Wenn zwei Dreiecke in einer Ebene so gelegen sind, daß je zwei entsprechende Seiten einander parallel sind, so laufen die Verbindungslinien der entsprechenden Ecken durch ein und denselben Punkt oder sind einander parallel, und umgekehrt* ») (Hilbert 1899 ; 1971, p. 122).

que la géométrie elle-même, et notamment à l'arithmétique, puisqu'il avait fondé la preuve de la consistance de son propre système axiomatique de la géométrie précisément sur le présupposé de la consistance de cette dernière¹⁰⁷. C'est ainsi que la conception hilbertienne de l'axiomatisation a fini par constituer le présupposé épistémologique et méthodologique fondamentale de la réponse que Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) lui-même et les membres de son école ont apportée à la question d'éclairer la nature des fondements du savoir mathématique, et plus précisément la nature des connaissances ultimes qui sont supposées fonder l'édifice entier de ce qu'on appelle les « mathématiques classiques » (« *classical mathematics* ») (Friedman 2009 ; Goldfarb 2009), c'est-à-dire le corps des connaissances mathématiques tel qu'il s'était consolidé au début du XX^e siècle, notamment sur la base de la « logique classique » (« *classical logic* ») et de la théorie des ensembles telle qu'ont fini par l'axiomatiser Ernst Zermelo (1904, 1908a, 1908b, 1929, 1930) et A. A. Fraenkel (1922, 1927) (Gabbay *et al.* 2009, 2012 ; Hallett 2013 ; Shapiro & Kissel 2018). Plus précisément, une telle réponse s'est concrétisée dans un projet de reconstruction formelle de l'édifice des connaissances mathématiques, sous la forme, justement, d'un système axiomatique qui serait formulé dans un langage non interprété, que l'on désigne communément par le nom de « formalisme » (« *formalism* ») (Zach 2019). Un tel projet se définissait, en outre, par opposition explicite aux

¹⁰⁷ Afin de démontrer que le cinq groupes d'axiomes qu'il avait énoncés n'étaient pas contradictoires – c'est-à-dire « qu'il n'est pas possible de déduire logiquement de ces propositions un fait en contradiction avec l'un de ces axiomes » (« *es ist nicht möglich, durch logische Schlüsse aus denselben eine Tatsache abzuleiten, welche einem der aufgestellten Axiome widerspricht* ») – Hilbert (1899) a construit, en effet, un domaine (« *Bereich* ») de nombres algébriques, Ω , c'est-à-dire l'ensemble de tous les nombres ω que l'on peut obtenir à partir du nombre 1 en appliquant, un nombre fini de fois, les quatre opérations arithmétiques classiques (addition, soustraction, multiplication, division), ainsi qu'une cinquième opération, $\sqrt{1 + \omega^2}$. Il a ensuite reformulé les axiomes de son propre système géométrique en remplaçant les points par des paires de nombres (x, y) de Ω , les droites par des rapports $(u : v : w)$ entre trois nombres quelconques de ce même domaine, à condition que u et v ne soient pas tous les deux nuls, et les relations que définissent les axiomes en question par des relations arithmétiques formellement homologues (en remplaçant, par exemple, la relation géométrique « le point A est sur la droite a » par la relation arithmétique « le couple de nombres (x, y) est tel que $ux + vy + w = 0$ »). Il a démontré, par la suite, que les axiomes de la géométrie, ainsi redéfinis, restaient valides même après que les systèmes d'objets auxquels ils faisaient référence avaient changé. Ce faisant, Hilbert (1899) a donc transformé son propre système axiomatique de la géométrie dans un système de l'arithmétique du domaine Ω , parfaitement homologue au premier, en démontrant, par ce même biais, que celui-ci pouvait être conçu comme étant une partie du second, si bien que « toute contradiction dans les conséquences des axiomes [de la géométrie hilbertienne] devrait apparaître dans l'arithmétique du domaine Ω » (« *jeder Widerspruch in den Folgerungen aus den linearen und ebenen Axiomen I-IV, V I müßte demnach auch in der Arithmetik des Bereiches Ω erkennbar sein* ») (Hilbert 1899 ; 1971, p. 54). C'est précisément dans un tel sens que l'on peut affirmer que Hilbert (1899) a fondé la consistance de son propre système géométrique sur celle de l'arithmétique, en réduisant ainsi la première à la seconde.

« anciennes tentatives en vue de fonder l'arithmétique et l'analyse sur la théorie des ensembles, puis celle-ci à son tour sur la logique pure » (« *die älteren Bestrebungen, Zahlentheorie und Analysis auf Mengenlehre sowie diese auf reine Logik zu gründen* ») (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 116), et qui ont constitué, précisément, l'essence du programme « logiciste » (« *logicism* ») (Carnap 1939, p. 48-51). Mais en quoi a donc consisté, plus précisément, le logiciste en tant que programme de reconstruction et de refondation du savoir mathématique ? Quels sont les problèmes logiques et philosophiques qu'il a essayé de résoudre ?

Par « logicisme » – ou « logistique » (« *Logistik* ») –, l'on entend, notamment, la « doctrine philosophique, fondatrice et fondationnaliste » (« *philosophical, foundational, and foundationalist doctrine* ») (Tennant 2017), communément associée aux noms de Richard Dedekind (1872, 1888), Gottlob Frege (1879), Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1910, 1912, 1913), qui a historiquement visé à réduire les différentes branches des mathématiques classiques – principalement l'arithmétique et l'analyse réelle – à la logique, en démontrant que tous les théorèmes, voire toutes les vérités, qui relèvent de ces mêmes branches ne sont rien d'autre que des vérités logiques (Tennant 2017). Plus précisément, comme l'observe Neil Tennant (2017), bien qu'il ait existé au moins une forme « faible » (« *weak* ») et une forme « forte » (« *strong* ») de logicisme¹⁰⁸, ces deux conceptions de la reconstruction formelle des fondements des mathématiques se sont inscrites dans la même lignée historique et ont partagé les mêmes présupposés fondamentaux. D'un point de vue historique, par exemple, il faut replacer les différentes formes de logicisme dans le contexte de deux mouvements qui ont marqué l'histoire des mathématiques, et qui était étroitement liés l'un à l'autre : d'une part, un mouvement vers « l'arithmétisation de l'analyse réelle (et complexe) » (« *the arithmetization of real (and complex) analysis* ») qui avait été initié par Carl Friedrich Gauss, Bernard Bolzano, Augustin Louis Cauchy et Karl Weierstrass, et dont le but était de prouver, en adoptant une méthode axiomatique, qu'il était possible de démontrer et de développer tous les théorèmes de l'analyse de manière « complètement conceptuelle et logique » (« *completely conceptual and logical* »), c'est-à-dire indépendamment de toute « intuition géométrique concernant les *continuum* spatiaux ou temporels » (« *a geometric intuitions concerning any spatial or temporal continua* ») (Tennant 2017) ; d'autre part, une prise de distance par rapport à la conception kantienne de l'arithmétique comme forme de connaissance *a priori* – c'est-à-dire absolument nécessaire, car indépendante non pas de telle ou telle expérience en particulier, mais de toute expérience empirique en général –, mais synthétique (« *synthetisch* ») – c'est-à-dire qui consisterait à mettre en relation des représentations

¹⁰⁸ Plus précisément, d'après le logicisme « fort », toutes les vérités mathématiques seraient réductibles à des vérités logiques, alors que, d'après le logicisme « faible », seulement les vérités mathématiques effectivement démontrables – c'est-à-dire les théorèmes – le seraient (Tennant 2017).

conceptuelles qui sont les unes indépendantes des autres¹⁰⁹. Contrairement à Kant (1787), des logiciens tels que Dedekind (1872, 1888) et Frege (1884) maintenaient qu'« au moins l'*arithmétique* est *analytique*, et non synthétique » (« *arithmetics, at least, is analytic, not synthetic* ») (Tennant 2017), et cela, entre autres raisons, en conséquence du fait que la définition qu'ils donnaient du concept d'« analytique » (« *analytisch* ») différait de celle qu'en avait donnée Kant (1781, 1787) lui-même. Frege (1884) estimait, par exemple, que Kant (1781, 1787) avait fourni une définition du concept de « jugement analytique » (« *analytisches Urtheil* ») qui était trop étroite, ce qui l'avait amené à en sous-évaluer l'importance pour la pensée mathématique et scientifique. C'est pourquoi il caractérisait de tels jugements non pas en fonction de leur « contenu » (« *Inhalt* »), mais en fonction de « ce qui nous justifie à les émettre » (« *die Berechtigung zur Urtheilsfällung* »), c'est-à-dire en fonction de la nature de la chaîne de déductions dont le jugement que l'on entend émettre constitue la conclusion. D'après une telle conception de l'analyticité, au cas où, en remontant cette même chaîne, l'on finirait par découvrir qu'elle repose uniquement sur « les vérités générales de la logique » (« *die allgemeinen logischen Gesetze* ») et sur des « définitions » (« *Definitionen* »), alors il faudrait considérer le jugement en question comme étant, justement, analytique. En conséquence, c'est

¹⁰⁹ « On devait sans doute penser d'abord que la proposition $7 + 5 = 12$ est une proposition simplement analytique [*ein bloß analytischer Satz*'], qui résulte d'après le principe de contradiction [*nach dem Satze des Widerspruchs*'] du concept d'une somme de sept et cinq [*aus dem Begriffe einer Summe von Sieben und Fünf*']. Mais, si on y regarde de plus près, on trouve que le concept de la somme de 7 et 5 ne contient rien de plus que la réunion de deux nombres en un unique [*die Vereinigung beider Zahlen in eine einzige*'], ce par quoi on ne pense absolument pas ce qu'est ce nombre unique, qui comprend les deux autres. Le concept de douze n'est aucunement déjà pensé du fait que je pense simplement cette réunion de sept et de cinq [*Der Begriff von Zwölf ist keinesweges dadurch schon gedacht*'], et j'aurai beau prolonger l'analyse de mon concept [*meinen Begriff...zergliedern*'] d'une telle somme possible, je n'y trouverai cependant pas le nombre douze. On doit aller au-delà de ces concepts, en s'aidant de l'intuition qui correspond à l'un des deux [*indem man die Anschauung zu Hülfe nimmt, die einem von beiden korrespondiert*'], par exemple ses cinq doigts, ou (comme Segner dans son arithmétique) cinq points, et ainsi ajouter progressivement les unités du nombre cinq donné dans l'intuition [*in der Anschauung gegeben*'] au concept du nombre sept. Je prends en effet d'abord le nombre 7, et en m'aidant pour le concept de 5 des doigts de ma main comme intuition, j'ajoute les unités que je prenais auparavant ensemble, [B16] pour composer le nombre 5, progressivement sur cette image que j'ai, au nombre 7, et je vois ainsi résulter le nombre 12. Que 7 devait être ajouté à 5 [*Daß 5 zu 7 hinzugetan werden sollten*'], je l'avais bien pensé dans le concept d'une somme = $7 + 5$, mais non que cette somme soit égale au nombre 12 [*aber nicht, daß diese Summe der Zahl 12 gleich sei*']. La proposition arithmétique est donc toujours synthétique [*Der arithmetische Satz ist also jederzeit synthetisch*']; ce que l'on réalise d'autant plus clairement que l'on prend des nombres quelque peu plus grands, parce qu'il saute alors aux yeux que nous pouvons tourner et retourner notre concept comme nous voulons : sans nous aider de l'intuition au moyen de la simple analyse de nos concepts, nous ne pourrions jamais trouver la somme [*wir, ohne die Anschauung zu Hülfe zu nehmen, vermittelst der bloßen Zergliederung unserer Begriffe die Summe niemals finden könnten*'] » (Kant 1787, B 15-16 ; 1980, p. 769-770).

précisément à ces deux sources historiques que les différentes formes de logicisme ont puisé l'idée qu'il serait nécessaire de réduire toutes les vérités, ou tous les théorèmes, des mathématiques à des fondements analytiques, au sens de Frege (1884), et *a priori*, au sens des mathématiciens qui avaient mené le projet d'arithmétisation de l'analyse, c'est-à-dire à des fondements qui soient indépendants non seulement de toute expérience empirique particulière, mais également de toute intuition spatiale ou temporelle.

D'un point de vue théorique, en revanche, les différentes versions du programme logiciste ont partagé, premièrement, le présupposé que « tous les objets qui constituent [le domaine particulier des mathématiques que l'on veut réduire à la logique] sont des objets logiques » (« *all the objects forming the subject matter of those branches of mathematics are logical objects* »), et, deuxièmement, le présupposé que

la logique – définie dans un sens suffisamment général et fort du terme, que le logiciste devra déterminer – est capable de fournir des définitions des concepts que les mathématiciens considèrent comme étant des concepts primitifs [*'furnishing definitions of the primitive concepts'*] de [ce même domaine des mathématiques], ce qui permet d'en déduire les 'principes premiers' [*'first principles'*] des mathématiciens en tant que résultats de la logique elle-même. (On dit ainsi que le domaine des mathématiques en question a été *réduit* à la logique) [*'(The branch of mathematics in question is thereby said to have been reduced to Logic)'*] (Tennant 2017).

Pour ce faire, il était nécessaire, d'une part, de reformuler les énoncés qui exprimaient les vérités, voire les théorèmes, de telle ou telle branche des mathématiques à l'aide d'un langage formel qui comportât aussi bien des signes logiques que des signes mathématiques et dont la fonction linguistique consistait à mettre en évidence la forme logique des énoncés en question, c'est-à-dire, pour reprendre les termes qu'utilisait Carnap (1934) lui-même, leurs propriétés syntaxiques – comme, justement, le langage que Gottlob Frege (1879) avait élaboré dans son *Idéographie (Begriffsschrift)* et que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont eux-mêmes perfectionné¹¹⁰. D'autre part, il était

¹¹⁰ Comme l'a précisé Russell (1918) lui-même au cours d'une conférence sur la philosophie de l'atomisme logique (« *the philosophy of logical atomism* »), il s'agissait de construire un « langage logiquement parfait » (« *logically perfect language* »), dans lequel « il y aura un mot et un seul pour chaque objet simple [*'there will be one word and no more for every simple object'*], et tout ce qui n'est pas simple sera exprimé au moyen d'une combinaison de mots [*'a combination of words'*]... Un tel langage sera complètement analytique et montrera immédiatement la structure du fait affirmé ou nié [*'A language of that sort will be completely analytic, and will show at a glance the logical structure of the facts asserted or denied'*]. Le langage exposé dans les *Principia Mathematica* prétend être un langage de cette espèce. C'est un langage

également nécessaire d'interpréter (c'est-à-dire d'attribuer une signification cognitive, qu'elle soit empirique ou logique, aux signes qui sont présents dans les formules, ou énoncés, dont se compose un calcul axiomatique donné, afin de pouvoir déterminer, par composition, le sens de ces mêmes énoncés) les signes proprement mathématiques qui figurent dans un tel langage en faisant référence aux différents types de signes qui relèvent de la logique symbolique – c'est-à-dire en faisant référence à des constantes logiques, des variables, des signes de « fonctions propositionnelles » (« *propositional functions* »), des signes de « classes » (« *classes* ») ou des signes de « relations » (« *relations* ») (Whitehead & Russell 1910, 1912, 1913)¹¹¹ – que Russell (1903, 1905, 1914a, 1914b,

qui n'a qu'une syntaxe et aucun vocabulaire [*'which has only syntax and no vocabulary whatsoever'*] ...Il a pour fin d'être un de ces langages qui, si on y ajoutait un vocabulaire, deviendrait un langage logiquement parfait » (Russell 1918 ; 1989, p. 356).

¹¹¹ Les concepts de fonction propositionnelle, classe et relation sont étroitement liés les uns aux autres. Une fonction propositionnelle se définit comme étant une fonction qui prend en argument, ou en arguments, des objets – qui peuvent être soit des noms d'individus, soit d'autres fonctions propositionnelles – et renvoie une proposition comme valeur, si bien que la fonction propositionnelle « *x aime y* » renvoie, par exemple, l'énoncé « Jacques aime Marie » lorsqu'elle prend les noms « Jacques » et « Marie » en arguments, dans cet ordre précis (voir « *propositional function* » in *Oxford Dictionary of Philosophy* 2008). L'on dit de certaines valeurs possibles des variables qui apparaissent dans une fonction propositionnelle donnée qu'elles la rendent vraie, ou qu'elles la satisfont, lorsque la proposition qu'on obtient en substituant ces mêmes valeurs à ces mêmes variables est, justement, vraie. Comme l'écrit Russell (1903) dans *Les Principes de la mathématique (The Principles of Mathematics)*, « φx est une fonction propositionnelle si, pour chaque valeur de x , φx est une proposition, déterminée [*'determinate'*] quand x est donné. Ainsi ' x est un homme' est une fonction propositionnelle. Dans n'importe quelle proposition, aussi compliquée soit-elle, qui ne contient pas de variable réelle [*'no real variables'*] [c'est-à-dire de variable libre], nous pouvons imaginer que l'un des termes [*'one of the terms'*], mais non pas un verbe ou un adjectif, est remplacé par d'autres termes : à la place de 'Socrate est un homme' nous pouvons mettre 'Platon est un homme', 'le nombre 2 est un homme', etc. ». Il en découle qu'une fonction propositionnelle « exprime le type de toutes les propositions de [telle ou telle] espèce » (« *expresses the type of all such propositions* »), c'est-à-dire de telle ou telle forme logique (Russell 1903 ; 1989, p. 42-43). C'est ainsi que le concept de fonction propositionnelle (prédicative) permet à Russell (1903) de définir celui de classe : « Les valeurs de x qui rendent une fonction propositionnelle φx vraie sont comme les racines d'une équation [*'the roots of an equation'*] – celles-ci sont en fait un cas particulier de celles-là – et nous pouvons prendre en considération toutes les valeurs de x telles que φx est vrai [*'the values of x such that φx is true'*]. En général, ces valeurs forment une *classe*, et une classe peut en fait être définie comme tous les termes qui satisfont une fonction propositionnelle quelconque [*'may be defined as all the terms satisfying some propositional function'*] » (Russell 1903 ; 1989, p. 43). Il en découle qu'une classe, en tant qu'ensemble de termes, peut également constituer l'extension « *extension* » d'une relation, telle que celle qu'exprime la fonction propositionnelle « xRy », ou « x a la relation R à y » (« *x has the relation R to y* ») (Russell 1903 ; 1989, p. 49). Comme l'écrivait toujours Russell (1903), « il nous faut une proposition primitive (c'est-à-dire indémontrable) [*'primitive (i.e. indemonstrable) proposition'*] énonçant que xRy est une proposition pour toutes les valeurs de x et de y [*'is a proposition for all values of x and y '*]. Nous avons alors à considérer les classes suivantes : la classe des termes qui ont la relation R à un terme ou un

1918) proposait de mettre, à leur tour, en relation avec des objets dont on pourrait avoir une « connaissance directe » (« *acquaintance* ») – comme, par exemple, les « données sensorielles » (« *sense-data* ») – au moyen d’une analyse philosophico-épistémologique de leur signification même¹¹². Il en découle que le programme logiciste de réduction des mathématiques à la logique symbolique a comporté, à la fois, une thèse qui concerne la syntaxe logique de la reconstruction formelle des concepts et des théories mathématiques et une thèse qui en concerne les aspects sémantiques. Pour ne donner qu’un exemple, il suffit de considérer la manière dont, dans les *Principia Mathematica*, Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) réduisent le concept de « nombre cardinal 1 » (« *cardinal number 1* »), qui constituait l’un des concepts primitifs du corps des mathématiques classiques, au concept logique de « classe unitaire » (« *unity class* »), c’est-à-dire au concept de « classe des objets qui sont identiques à un certain objet indéterminé x », ou, pour utiliser la notation qu’employaient les auteurs mêmes, au concept que l’on peut définir formellement de la manière suivante :

autre [*the class of terms which have the relation R to some term or other*], que j’appellerai la classe des *référents* par rapport à R [*the class of referents with respect to R*] ; et la classe des termes à quoi un terme quelconque a la relation R [*the class of terms to which some term has the relation R*], que j’appellerai la classe des *relata* [*the class of relata*]. Ainsi, si R est la paternité, les *référents* seront les pères et les *relata* seront les enfants. Nous devons également considérer les classes correspondantes pour des termes particuliers ou des classes de termes [*the corresponding classes with respect to particular terms or classes of terms*] : les enfants d’un tel, ou les enfants des Londoniens en fournissent des illustrations » (Russell 1903 ; 1989, p. 49).

¹¹² C’est pourquoi, toujours dans *Les Principes de la mathématique*, Russell (1903) présente sa propre version du programme logiciste comme consistant à atteindre « deux objectifs principaux » (« *two main objects* »), qui correspondent, respectivement, à la tâche de la logique symbolique ou mathématique et à la tâche de la logique philosophique, telles que les concevait Russell (1903) lui-même : « L’un est de fournir la preuve que la totalité de la mathématique pure traite exclusivement de concepts définissables au moyen d’un très petit nombre de concepts logiques fondamentaux, et que toutes ses propositions sont déductibles à partir d’un très petit nombre de principes logiques fondamentaux [*the proof that all pure mathematics deals exclusively with concepts definable in terms of a very small number of fundamental logical concepts, and that all its propositions are deducible from a very small number of fundamental logical principles*]...La démonstration de cette thèse possède, si je ne me trompe, toute la certitude et la précision dont les démonstrations mathématiques sont capables...L’autre objectif de ce travail...est d’expliquer les concepts fondamentaux que la mathématique admet comme indéfinissables. Il s’agit là d’une tâche purement philosophique [*the explanation of the fundamental concepts which mathematics accepts as indefinable*]...L’examen des indéfinissables – qui constitue la partie principale de la logique philosophique [*the chief part of philosophical logic*] – est un effort pour voir – et faire voir aux autres – clairement ces entités, de façon que l’esprit puisse en avoir cette sorte de connaissance directe [*that kind of acquaintance*] que l’on a du rouge ou du goût d’un ananas » (Russell 1903 ; 1989, p. 3).

$$l'x = \hat{y}(y = x) \quad Df,$$

où « $l'x$ » est, justement, le signe que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) avaient choisi pour désigner le concept logique de « classe unitaire pour un certain objet x » et l'expression « $\hat{y}(y = x)$ » signifie « la classe des objets $[y]$ qui sont identiques avec $[l'objet] x$ » (« *the class of objects which are identical with x* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 268). Plus précisément, dans la partie du premier livre des *Principia Mathematica* qui est consacrée aux *Prolégomènes à l'arithmétique cardinale* (*Prolegomena to cardinal arithmetics*), Whitehead et Russell (1910) définissent le nombre cardinal 1 comme étant « la classe de toutes les classes unitaires » (« *the class of all unit classes* »), en se servant de l'expression suivante :

$$1 = \hat{\alpha}\{(\exists x). \alpha = l'x\} \quad Df,$$

(Whitehead & Russell 1910 ; 1989, p. 388), qui signifie, précisément, « le nombre 1 est, par définition, la classe des classes α dont on peut affirmer qu'elles sont des classes unitaires pour au moins un objet x donné ». Nous pouvons donc en conclure que c'est précisément le langage formel qu'utilisaient Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) qui leur a donné les moyens de réduire le concept de nombre cardinal 1 au concept logique de classe unitaire, en procédant par deux étapes, à savoir en attribuant une signification logique au signe de constante mathématique « 1 », conformément à la thèse au sujet de la reconstruction sémantique des fondements des mathématiques qui était propre au programme logiciste, après avoir mis en évidence la structure et les propriétés, justement, logiques (« *logical properties* »)¹¹³ du concept qui y est associé, et que les mathématiciens

¹¹³ L'une des propriétés logiques fondamentales du nombre cardinal 1 – par opposition à ses propriétés arithmétiques (« *arithmetical properties* »), c'est-à-dire aux propriétés qui concernent l'usage que l'on peut faire d'un tel nombre en lui appliquant les quatre opérations arithmétiques (somme, multiplication, soustraction, division) – consiste, par exemple, en ce qui suit :

$$\vdash: \hat{z}(\phi z) \in 1. \equiv . E!(1x)(\phi x)$$

(Whitehead & Russell 1910 ; 1989, p. 348). Plus précisément, cette expression signifie « affirmer que 'la classe déterminée par [la fonction propositionnelle] $\phi\hat{x}$ ' [*the class determined by $\phi\hat{x}$*], c'est-à-dire ' $\hat{z}(\phi z)$ ' (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 251), appartient au nombre cardinal 1, en tant que classe de toutes les classes unitaires, équivaut, logiquement, à affirmer que 'le x satisfaisant $\phi\hat{x}$ existe' [*the x satisfying $\phi\hat{x}$ exists*], c'est-à-dire ' $E!(1x)(\phi x)$ ' (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 261), ou, plus précisément, qu'il existe un seul et unique objet qui rend la fonction propositionnelle ' $\phi\hat{x}$ ' vraie, de telle sorte que, si l'on attribue à la variable x n'importe quelle autre de ses valeurs

considéraient comme étant un concept primitif de l'arithmétique, c'est-à-dire après avoir analysé un tel concept en accord avec la thèse syntaxique qui caractérisait, encore une fois, le logicisme. En conséquence, ce sont précisément les deux thèses qu'exemplifient les arguments de Whitehead et Russell (1910) que nous venons de présenter, l'une de nature syntaxique et l'autre de nature sémantique, qui constituaient le noyau du projet logiciste et qui ont fini par inspirer l'approche de l'analyse logique des concepts que l'on peut retrouver, par exemple, dans *La Construction logique du monde*, « à tel point que Carnap [(1928)] est peut-être l'un des rares, avec Wittgenstein [(1922)], à avoir appliqué fidèlement la conception frégréenne de l'analytique à un domaine autre que les mathématiques » (Ouelbani 2006, p 59).

Cela dit, nous pouvons également en conclure que, au vu de l'importance que le concept de classe jouait dans le projet de réduction des mathématiques à la logique qu'avait initié Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), la théorie des ensembles¹¹⁴ constituait, à côté du calcul logique (des propositions, des classes ou des relations), le pilier fondamental du logicisme des *Principia Mathematica*. C'est précisément pour une telle raison que le programme logiciste, notamment dans sa version whiteheadienne et russellienne, a fini par se heurter aux différents paradoxes qui ont marqué le développement de la théorie des ensembles et de la logique mathématique dans les premières décennies du XX^e siècle, notamment à la suite des tentatives d'élucider les propriétés du système des

possibles, la fonction ' ϕx ' ne sera pas satisfaite : autrement dit, il existe une seule proposition vraie qui correspond à la fonction propositionnelle en question ». Une telle propriété est, par conséquent, particulièrement importante car elle nous montre en quoi le formalisme de Whitehead et Russell (1910) permet de caractériser le concept de nombre cardinal 1 de manière logico-linguistique, c'est-à-dire de le définir comme étant la classe de toutes les classes qui sont déterminées par un type bien particulier de fonctions propositionnelles, c'est-à-dire par des fonctions qui ne sont satisfaites que par une seule et unique valeur possible de leurs variables. Whitehead et Russell (1910) appelaient de telles fonctions « fonctions descriptives » (« *descriptive functions* »), comme, par exemple, la fonction « $R'y$ » – où « R » est « la relation de fils à père » (« *the relation of son to father* ») –, qui veut dire « le fils de y » (« *the son of y* ») et « qui 'n'existe' que si y a un fils et un seul » (« *which will only 'exist' if y has one son and no more* ») (Whitehead & Russell 1910 ; 1989 ; p. 262). Il en découle qu'une telle manière de définir le concept de nombre cardinal 1 nous permet de formaliser la relation intuitive que l'on peut établir entre ce dernier et le concept d'« unicité ».

¹¹⁴ De manière très succincte, l'on peut définir la théorie des ensembles comme étant « la théorie mathématique de collections bien déterminées, appelées *ensembles*, d'objets qui sont appelés *membres*, ou *éléments*, de l'ensemble [en question] » (« *the mathematical theory of well-determined collections, called sets, of objects that are called members, or elements, of the set* »), qui a fini par devenir, justement, aussi bien le langage que l'appareil formel standard pour la systématisation des fondements des mathématiques, en ceci que « l'on peut envisager tout objet mathématique comme étant un ensemble et [que] l'on peut déduire, dans le calcul des prédicats, tous les théorèmes des mathématiques des axiomes de la théorie des ensembles » (« *every mathematical object can be viewed as a set, and every theorem of mathematics can be logically deduced in the Predicate Calculus from the axioms of set theory* ») (Bagaria 2019).

nombre transfinis (c'est-à-dire de la seconde classe ou des classes supérieures) dont le mathématicien allemand Georg Cantor (1883) venait de jeter les fondements¹¹⁵ (Cantini 2009), dans le but d'édifier

¹¹⁵ Le concept de nombre de la seconde classe est un concept qui a été introduit par le mathématicien allemand Georg Cantor (1883) « dans le but de continuer la série des nombres entiers réels au-delà de l'infini » (Cantor 1883, p. 381). Plus précisément, il repose sur le présupposé de l'existence d'un infini mathématique « *proprement dit* » (Cantor 1883, p. 382), c'est-à-dire d'un infini qui ne se réduit pas à la tendance d'une grandeur finie à croître ou à décroître au-delà de toute limite, mais que l'on peut définir, au contraire, de manière entièrement déterminée, comme étant un point infiniment éloigné dans l'espace qui représente le domaine d'une fonction analytique donnée, dont il est possible d'étudier les propriétés au voisinage d'un tel point. Lorsqu'on envisage le concept d'infini d'une telle manière, l'on peut également imaginer l'existence d'une suite infinie de points infiniment éloignés qui entretiennent, les uns avec les autres, des relations régulières. D'un point de vue arithmétique, cela se traduit par la possibilité de construire des nombres infinis en se servant de « principes de formation » tels que ce que Cantor (1883) appelait le « *premier principe de formation* », qui n'est rien d'autre que « le principe de l'addition d'une unité à un nombre *déjà formé* » (Cantor 1883, p. 385). C'est précisément au moyen de ce principe que l'on peut constituer la « *première classe de nombres (I)* », c'est-à-dire « le système des nombres entiers finis $1, 2, 3, \dots, \nu, \dots$ » (Cantor 1883, p. 383), qui contient une quantité infinie d'éléments. De cette manière, l'on peut également définir un nouveau nombre, ω , en tant que premier successeur entier de tous les nombres ν de cette première classe. Il en découle que le nombre ω est infini précisément en ceci qu'il sert à « *exprimer que tout l'ensemble (I) est donné d'après la loi dans sa succession naturelle* » (Cantor 1883, p. 385). En appliquant à ω le premier principe de formation de Cantor (1883), l'on peut donc construire une suite infinie de nombres infinis $\omega + 1, \omega + 2, \dots, \omega + \nu, \dots$, et définir un autre nombre, 2ω , qui n'est rien d'autre que le premier successeur entier de cette seconde suite. Un tel procédé a donc permis à Cantor (1883) de définir un autre principe de formation, qui est le suivant : « *Etant donné une succession quelconque déterminée de nombres entiers réels définis, parmi lesquels il n'y en a pas qui soit plus grand que tous les autres, on pose, en s'appuyant sur ce deuxième principe de formation, un nouveau nombre que l'on regarde comme la limite des premiers, c. à d. qui est défini comme étant immédiatement supérieur à tous ces nombres* » (Cantor 1883, p. 386). C'est sur la base de ces deux principes de formation que l'on peut construire, justement, « la seconde classe de nombres (II), composée de certains nombres entiers infinis α se suivant entre eux dans un ordre de succession déterminé :

$$\omega, \omega + 1, \omega + 2, \dots, 2\omega, 2\omega + 1, \dots, \nu_0 \omega^\mu + \nu_1 \omega^{\mu-1} + \dots + \nu_{\mu-1} \omega + \nu_\mu, \dots, \omega^\omega, \dots, \omega^{\omega^\omega}, \dots, \alpha, \dots ;$$

la seconde classe de nombres une fois définie, on arrive à la troisième, puis à la quatrième, et ainsi de suite » (Cantor 1883, p. 383-384). De plus, les nombres de cette seconde classe sont soumis à une condition formelle, que Cantor (1883) appelle « *principe d'arrêt ou de limitation* » (Cantor 1883, p. 387) et qui se résume à l'affirmation suivante : « *que le système des nombres qui se trouvent, dans la suite des nombres, avant celui qu'on considère et à partir de 1, soit de la même puissance que la première classe de nombres (I)* » (Cantor 1883, p. 387), ce qui veut dire qu'il est possible d'établir, entre un tel système de nombres et la classe de nombres (I), « d'élément à élément, une correspondance réciproque à sens unique » (Cantor 1883, p. 384). Par exemple, si l'on considère le nombre ω^ω , le système des nombres qui le précèdent dans la classe de nombres (II) s'exprime par la formule

une véritable « science de l’infini » (Poincaré 1906). En suivant la classification de ces mêmes paradoxes qu’a dressée Frank Ramsey (1925, 1931), nous pouvons les ranger en deux groupes distincts. Le premier groupe consiste en des paradoxes logiques ou syntaxiques, en ceci qu’ils « ne comportent que des termes logiques ou mathématiques tels que classe et nombre [*involve only logical or mathematical terms such as class and number*] et [ils] montrent qu’il doit y avoir quelque chose qui ne va pas dans notre logique ou dans nos mathématiques » (Ramsey 1925, 1931 ; 2003, p. 86). L’autre groupe se compose, en revanche, de paradoxes qui sont de nature épistémologique ou sémantique, puisqu’il s’agit de contradictions « qui ne peuvent pas être énoncées en termes seulement logiques [*cannot be stated in logical terms alone*] car elles contiennent toutes quelque référence à la pensée, au langage ou au symbolisme [*some reference to thought, language or symbolism*], qui sont des termes non pas formels mais empiriques [*which are not formal but empirical terms*] » (Ramsey 1925, 1931 ; 2003, p. 86), si bien qu’elles ont trait non pas à la forme logique de tel ou tel énoncé, mais à son contenu. Pour ne donner qu’un exemple de paradoxe du premier groupe, le mathématicien italien Cesare Burali-Forti (1897) avait identifié une contradiction inhérente au système des nombres ordinaux transfinitis de Cantor (1883), et notamment au concept même de « nombre ordinal de tous les nombres ordinaux », que nous pouvons résumer de la manière suivante. De manière très simplifiée, l’on peut définir les nombres ordinaux transfinitis comme étant des ensembles « transitifs » (« *transitive* ») – c’est-à-dire tels que chacun de leurs éléments soit, en même temps, l’un de leurs sous-ensembles – et « bien ordonnés par la relation d’appartenance \in » (« *well-ordered by \in* ») – c’est-à-dire comme étant des ensembles auxquels il est possible d’attribuer un certain rang dans une série linéaire donnée, sur la base d’une quelconque relation d’isomorphisme avec les membres d’une autre classe d’ensembles bien ordonnés, et qui contiennent tous les ensembles qui les précèdent dans la série en question (Jech 2006, p. 19). Si l’on considère « la série des ordinaux allant jusqu’à un ordinal quelconque donné, et l’incluant » (« *the series of ordinals up to and including any given ordinal* »), il est possible de démontrer non seulement qu’une telle série possède

$$v_0\omega^\mu + v_1\omega^{\mu-1} + \dots + v_{\mu-1}\omega + v_\mu$$

« où $\mu, v_0, v_1, \dots, v_\mu$ peuvent prendre toutes les valeurs finies positives entières, y compris zéro, et à l’exclusion de la combinaison $v_0 = v_1 = \dots = v_\mu = 0$. Comme on le sait, ce système peut se mettre sous forme d’une série *simplement* infinie et il a par conséquent *la même puissance que (I)* » (Cantor 1883, p. 387-388). Il en découle que la classe des nombres (II) peut être considéré comme une suite infinie, et donc un ensemble infini, de suites infinies, et donc d’ensembles infinis, du même ordre de grandeur que l’ensemble des nombres naturelles. Comme l’a démontré Cantor (1883) lui-même, la classe des nombres (II) possède, en conséquence, « *la puissance immédiatement supérieure* » (Cantor 1883, p. 387) à celle de l’ensemble des nombres naturels, c’est-à-dire la puissance du continu.

elle-même un ordre ordinal, mais également que ce dernier « est supérieur d'une unité à l'ordinal donné » (« *exceeds the given ordinal by one* »). Il en découle que, comme la série de tous les nombres est, elle aussi, bien ordonnée, il est possible de définir le concept de « nombre ordinal de tous les ordinaux » (« *the ordinal number of all ordinals* »), Ω , qui ne sera rien d'autre que le nombre ordinal que l'on peut attribuer à une telle série (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 301-302). Cependant, comme Ω est lui-même un nombre ordinal, il s'ensuit que la série de tous les nombres ordinaux n'est rien d'autre que la série des nombres ordinaux allant jusqu'à Ω et l'incluant, si bien que, d'après ce que nous venons d'indiquer plus haut, nous sommes contraints d'en conclure qu'elle possède le nombre ordinal $\Omega + 1 > \Omega$, d'où, précisément, le paradoxe de Burali-Forti (1897). Un autre exemple de contradiction logique, liée aussi bien à la théorie des ensembles qu'à la logique mathématique, dans la mesure où elle repose sur le concept de classe, est le paradoxe au sujet de la question de savoir si la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes est membre d'elle-même que Russell (1903) décela lorsqu'il était en train d'étudier le premier tome de *Les Lois fondamentales de l'arithmétique* (*Grundgesetze der Arithmetik*) de Frege (1893). Tel que le résumait Whitehead et Russell (1910) lui-même dans les *Principia Mathematica*, ce paradoxe affirme le suivant : « Soit w la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes [*the class of all those classes which are not members of themselves.*']. Alors quoi que la classe x puisse être, [l'énoncé] ' x est un w ' est équivalent à ' x n'est pas un x '. Aussi, si l'on donne à x la valeur w , ' w est un w ' est équivalent à ' w n'est pas un w ' [*'w is a w' is equivalent to 'w is not a w'*'] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 301). Quant aux contradictions du second groupe, il suffit de mentionner le paradoxe, bien connu, d'« Épiménide le Crétois » (« *Epimenides the Cretan* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 301), dont on disait qu'il affirmait que tous les Crétois ne racontaient que des mensonges, si bien que, étant lui-même crétois, s'il disait vrai, alors ils mentait, et inversement. Mais en quoi consistent donc les solutions que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont apportées à ces trois paradoxes, ainsi qu'à d'autres contradictions similaires (Ramsey 1925, 1931 ; Cantini 2009) ? En quoi l'analyse de ces mêmes solutions nous permettrait-elle de mettre en lumière les faiblesses des deux thèses, syntaxique et sémantique, qui caractérisaient le programme logiciste, et notamment dans la version de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ? En quoi ces mêmes faiblesses ont-elles fini par constituer le point de départ du programme formaliste, tel qu'il s'est développé au cours des années 1920 ?

2.1.2 Les objets de la logique symbolique existent-ils vraiment ? Deux interprétations de la solution que Russell et Whitehead ont apportée aux paradoxes de la théorie des ensembles

Lorsqu'on analyse ces paradoxes, on peut s'apercevoir du fait qu'ils tiennent tous à l'existence de ce qu'on a appelé des « agrégats inconsistants » (« *inconsistent aggregates* ») (Russell 1906), c'est-à-dire des classes d'objets (qu'elles soient ordonnées ou non) auxquelles il n'est pas possible d'associer une définition analytique, ou norme (« *norm* ») (Russell 1906), donnée, c'est-à-dire une expression arithmétique qui serait à même de déterminer, à priori, la propriété, ou les propriétés, que doit posséder tel ou tel élément afin qu'on puisse le ranger dans la classe en question, si bien que l'on pourrait considérer de telles contradictions comme étant toutes la conséquence d'un seul et même présupposé fallacieux : le présupposé que l'existence d'une norme constituerait toujours une condition à la fois nécessaire et suffisante pour l'existence de la classe correspondante. C'est pourquoi, dans un article datant de 1906 et consacré, précisément, à quelques difficultés concernant la théorie des nombres transfinis et des types ordonnés (*On some difficulties in the theory of transfinite numbers and ordered types*), Russell (1906) se penche sur le problème d'identifier « les conditions exactes qu'une norme doit satisfaire afin qu'elle puisse définir un agrégat », c'est-à-dire une classe (« *the precise conditions which a norm must fulfil in order to define an aggregate* ») (Russell 1906, p. 30). D'un point de vue logico-symbolique, expliquait-il, toute norme s'exprime sous la forme d'une « fonction propositionnelle » (« *propositional function* ») à une variable « $\varphi(x)$ », ou « $\varphi\hat{x}$ », du langage formel que l'on est en train d'utiliser, c'est-à-dire comme étant une formule qui dénote, de manière ambiguë, une classe d'énoncés « $\varphi(a)$ », « $\varphi(b)$ », etc., où « a », « b », etc., sont, justement, les valeurs que l'on peut attribuer à l'argument, c'est-à-dire à la variable « réelle » (« *real variable* »), car libre – par opposition à de possibles variables « apparentes » (« *apparent variables* ») (Russell 1908), c'est-à-dire liées par des quantificateurs universels ou existentiels –, qui y figure¹¹⁶, si bien que l'expression « $\varphi(x)$ » = « x est mortel » peut être considérée comme étant, justement, une fonction propositionnelle dont l'énoncé « $\varphi(Socrate)$ » = « *Socrate* est mortel » est l'une des valeurs possibles, tout comme les expressions « $\psi(x)$ » = « $x^2 = 4$ » et « $\psi(2)$ » = « $2^2 = 4$ » sont également, respectivement, une fonction propositionnelle et un énoncé de nature mathématique (Russell 1903, 1906 ; Whitehead & Russell 1910, 1912, 1913). En conséquence, c'est précisément en généralisant le concept arithmétique de norme au moyen du concept logique de fonction

¹¹⁶ Dans les *Principia Mathematica*, Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) utilisaient le symbole « $\varphi\hat{x}$ » ou « $\varphi(x)$ » pour désigner une fonction propositionnelle et le symbole « φx » pour désigner toujours, de manière ambiguë, l'un des énoncés que l'on peut obtenir en remplaçant l'argument de la fonction en question par une valeur particulière.

propositionnelle que Russell (1906) comptait donner une solution générale aux différents paradoxes qu'avait soulevés la théorie des nombres transfinis de Cantor (1883), sous la forme d'une théorie permettant de tracer une distinction formelle entre deux types de fonctions propositionnelles, à savoir les fonctions, ou propriétés, « prédicatives » (« *predicative functions* », « *predicative properties* ») (Russell 1906, p. 34), en tant que fonctions qui permettent de définir une classe en tant que collection ou agrégat d'objets qui partagent une certaine propriété, et les fonctions, ou propriétés, « imprédicatives » (« *impredicative functions* », « *impredicative properties* ») (Russell 1906, p. 34), c'est-à-dire des fonctions qui définissent des classes qui ne sont pas vraiment des classes, telles que, justement, la série de tous les nombres ordinaux, la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes, ou encore l'ensemble de tous les énoncés qui sont émis par les Crétois.

C'est ainsi que, toujours dans son article datant de 1906, Russell (1906) propose deux sortes de théories. D'une part, Russell (1906) esquisse deux théories qui consistent à définir les propriétés que doivent satisfaire les expressions que l'on peut accepter comme constituant les fonctions propositionnelles d'un langage donné, de telle sorte que l'on puisse éliminer, d'emblée, toutes les expressions qui constituent des fonctions imprédicatives. La première de ces deux théories, que Russell (1906) appelait la « théorie du zigzag » (« *zigzag theory* »), affirme que les expressions qui constituent des fonctions imprédicatives possèdent une propriété formelle particulière, c'est-à-dire la « zigzagité » (« *zigzagness* »), que l'on peut définir de la manière suivante : étant donnée une certaine classe u , une fonction « $\varphi(x)$ » est imprédicative par rapport à une telle classe si elle est vraie – c'est-à-dire si elle dénote un énoncé qui est vrai – pour quelques éléments de u , mais non pas pour tous les éléments de u , ainsi que si elle est fautive – c'est-à-dire si elle dénote un énoncé qui est faux – pour quelques éléments de $\sim u$ – c'est-à-dire de la classe qui est, supposément, définie par la négation de « $\varphi(x)$ », « $\sim\varphi(x)$ » – mais non pas pour tous les éléments de $\sim u$ (Russell 1906, p. 38). L'autre théorie, qui est directement inspirée par le paradoxe de Burali-Forti (1897), consiste, en revanche, à imposer une contrainte non pas à la forme des fonctions propositionnelles que l'on peut considérer comme étant prédicatives, mais à leur extension, en ceci qu'elle repose sur le présupposé suivant : « il faut toujours que l'on puisse ranger les éléments d'une classe au sens propre du terme dans une série bien ordonnée qui est, en ordre de grandeur, ordinalement similaire à un segment de la série des nombres ordinaux [c'est-à-dire définie par la même relation d'ordre qui définit un tel segment] » (« *a proper class must always be capable of being arranged in a well-ordered series ordinally similar to a segment of the series of ordinals in order of magnitude* ») (Russell 1906, p. 43), et donc non pas à la série entière, ce qui permet, justement, de ne pas tomber dans le paradoxe de Burali-Forti (1897). Poser une telle condition revient, en conséquence, à fixer une limite à la taille que peut atteindre telle ou telle classe, au sens propre terme, ce qui empêche d'inclure dans la même catégorie logique que

les classes proprement dites toutes les collections d'objets qui sont censées être les derniers produits de processus génératifs dont on peut démontrer qu'ils sont, en réalité, infinis, tels que, précisément, le processus qui permet de construire la série de tous les nombres ordinaux. D'autre part, toujours dans ce même article, Russell (1906) avance également une troisième théorie, appelée « théorie sans classes » (« *no-class theory* »), qui consiste, en revanche, dans l'idée que « les classes, les relations [en tant que classes de couples, de triplets, de quadruplets, etc. d'objets qui satisfont une quelque fonction propositionnelle, respectivement, à deux, à trois, à quatre, etc. places] et les fonctions n'existent pas en tant qu'entités et que l'habitude d'en parler n'est qu'un raccourci commode » (« *there are no such things as classes and relations and functions as entities, and that the habit of talking of them is merely a convenient abbreviation* ») (Russell 1906, p. 37). Cette théorie implique, par conséquent, la nécessité de redéfinir le concept même de fonction propositionnelle, ainsi que de reformuler la notation qui y est associée. C'est pourquoi Russell (1906) propose de remplacer le signe de fonction « $\varphi(x)$ », qui présuppose l'existence d'une collection d'objets qui possèdent la propriété qu'exprime la fonction en question, par le signe « $p \frac{x}{a}$ », où « p » désigne un énoncé donné et « a » désigne l'un des composants élémentaires de ce même énoncé, et plus précisément son « *sujet originaire* ou *initial* » (« *origin or initial subject* ») (Russell 1906, p. 45). Il en découle que ce que désigne l'expression « $p \frac{x}{a}$ » elle-même n'est rien d'autre qu'une forme propositionnelle dont l'énoncé « p », contenant le sujet « a », ne serait que le « prototype » (« *prototype* ») (Russell 1906, p. 45), alors que tous les autres énoncés que l'on peut obtenir en remplaçant la variable x par un autre sujet en seraient les différentes instanciations¹¹⁷. Cela dit, n'ayant pas l'ambition de trancher la question de savoir laquelle de ces trois théories devrait être retenue, Russell (1906) se limite à conclure son article en mettant l'accent sur le fait que la théorie sans classes a certes l'avantage de n'adopter aucun présupposé ontologique douteux, mais qu'il est impossible de savoir si son développement permettra de démontrer tous les théorèmes de l'arithmétique, et notamment tous les théorèmes de l'arithmétique transfinie de Cantor (1883).

En conséquence, c'est précisément aux limites des trois théories proposées par Russell (1906) que s'attaque Henri Poincaré (1906) dans un article datant de la même année et consacré aux relations entre les mathématiques et la logique symbolique. Dans cet autre article, Poincaré (1906) analyse, à

¹¹⁷ De cette manière, au lieu de parler de la « fonction unitaire » (« *unit fonction* ») « $\varphi(x)$ » comme étant une fonction telle qu'il existe une et une seule valeur de x pour laquelle « $\varphi(x)$ » est vraie, ce qui présuppose l'existence d'une « classe unitaire » (« *unit class* ») qui coïnciderait avec une telle valeur unique de x , nous pouvons parler d'une forme propositionnelle « $p \frac{x}{a}$ » dont il existe une seule instanciation vraie, c'est-à-dire d'une forme propositionnelle qui admet une seule et unique substitution « *salva veritate* » de son propre sujet initial (Russell 1906, p. 46).

son tour, ce qu'il appelle « les paradoxes cantoriciens », comme le paradoxe de Burali-Forti (1897), et il en conclut que les problèmes qu'ils posent ne sont pas de nature logique, en ceci qu'ils ne concernent pas la nature des fonctions propositionnelles ou les présupposés ontologiques que recèle leur théorie, mais sur une propriété particulière qui est propre à toutes les classes de nombres qui font l'objet des différentes contradictions. Cette propriété consisterait précisément dans ce que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) appellent eux-mêmes dans les *Principia Mathematica*, en reprenant ainsi à leur compte une partie de l'analyse de Poincaré (1906), « le principe du cercle vicieux » (« *the vicious-circle principle* ») (Whitehead & Russell 1910) et qui consiste à admettre l'existence, dans l'arithmétique et dans la théorie des ensembles, de « totalités illégitimes » (« *illegitimate totalities* »), c'est-à-dire d'ensembles qui possèdent quelques éléments dont la définition fait référence à l'ensemble même dont ils sont membres, en tant que totalité. L'ensemble de tous les ordinaux constitue, bien évidemment, une totalité illégitime – et cela précisément parce qu'il contient un élément qui n'est définissable qu'en faisant référence à la totalité des nombres ordinaux, à laquelle il appartient pourtant lui-même, c'est-à-dire l'ordinal de tous les ordinaux – tout comme la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes – en ceci que non seulement la norme qui permet d'en déterminer les éléments présuppose l'existence d'une telle classe, mais de tels éléments sont également, eux-mêmes, des totalités dont les critères d'appartenance sont définis de manière parfaitement circulaire, si bien qu'il s'agit d'une totalité de totalités illégitimes. De la même manière, l'énoncé « les Crétois mentent toujours » est équivalent à l'énoncé « pour tous les énoncés p , si un Crétois affirme p , alors p est faux », c'est-à-dire à un énoncé qui porte sur la totalité des énoncés qui sont affirmés par des Crétois, puisque, afin de déterminer s'il est vrai ou faux, il est nécessaire de passer en revue, justement, tous les énoncés de cette nature afin de s'assurer du fait qu'il n'en existe pas un qui soit vrai. Il en découle que, lorsqu'il est prononcé par un Crétois, tel Épiménide, l'énoncé « (j'affirme que) les Crétois mentent toujours » appartient lui-même à une telle totalité, tout en étant défini par rapport à cette dernière, si bien qu'on peut la considérer comme étant une totalité illégitime. C'est ainsi que, aussi bien pour Poincaré (1906) que pour Russell (1908) et Whitehead (Whitehead & Russell 1910, 1912, 1913), les normes ou définitions imprédicatives étaient, en définitive, telles parce qu'elles étaient circulaires, ou autoréférentielles. Mais comment éviter donc des cercles vicieux tels que ceux qui permettent de définir des totalités illégitimes comme, encore une fois, la série de tous les nombres ordinaux, la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes, ou encore l'ensemble de tous les énoncés qui sont émis par les Crétois ? Comme l'explique Solomon Feferman (2005), alors que Poincaré (1906) était parvenu à la conclusion que le principe du cercle vicieux était une conséquence du fait que la théorie des nombres transfinis admettait l'existence de classes d'objets qui étaient de taille infinie non pas tout simplement en puissance, mais en acte,

Russell (1908) était persuadé du fait qu'il fallait considérer comme étant des totalités légitimes non seulement les classes de taille finie, mais également, de manière plus générale, toutes les classes dont les membres étaient « logiquement homogènes ». Par « homogénéité logique » (« *logical homogeneity* », Russell (1908) entendait, plus précisément, la « propriété...d'appartenir à une certaine collection dont les termes sont tous contenus dans le parcours de signification d'une seule et même fonction [propositionnelle] » (« *property...to belong to any collection whose terms are all contained within the range of significance of some one function* ») (Russell 1908, p. 236). Dans une telle perspective, la classe de tous les hommes constituerait donc une totalité légitime non pas parce qu'il existerait un nombre fini d'hommes, mais parce qu'elle coïnciderait avec l'ensemble des valeurs de la variable x dont se compose le « parcours de signification » (« *range of significance* ») de la fonction propositionnelle « x est un homme ». Mais qu'est-ce que donc, plus concrètement, le parcours de signification d'une fonction propositionnelle donnée ? En quoi l'introduction d'un tel concept a donné à Russell (1903, 1908), ainsi qu'à Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), les moyens de formuler une quatrième théorie des fonctions propositionnelles visant à résoudre les paradoxes qui découlent des définitions imprédicatives et des totalités illégitimes qu'elles caractérisent ?

C'est précisément le concept de parcours de signification d'une fonction propositionnelle donnée qui a permis à Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) de développer ce qu'on appelle communément une « théorie des types logiques (dite 'ramifiée') » (« (*'ramified'*) *theory of logical types* »). Telle que la présentent Russell (1903), dans l'*Appendice B* à *Les Principes de la mathématique* et dans son article de 1908, ainsi que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) dans les *Principia Mathematica*, cette théorie consiste en un langage-système, pour utiliser les mots de Carnap (1932b), logico-mathématique qui satisfait les deux conditions suivantes. Premièrement, chaque fonction propositionnelle « $\varphi(x)$ », ou « $\varphi\hat{x}$ » du langage formel en question est associée non seulement à un « parcours de vérité » (« *range of truth* »), c'est-à-dire à un ensemble de valeurs de l'argument x qui rendent vrai l'énoncé que l'on peut obtenir en remplaçant ce dernier par l'une ou l'autre de ces mêmes valeurs dans « $\varphi(x)$ », mais également, justement, à un « parcours de signification » (« *range of significance* »), c'est-à-dire à un ensemble de valeurs telles que l'énoncé que l'on peut obtenir en remplaçant l'argument x par la valeur en question dans « $\varphi(x)$ » soit doué de sens (Russell 1903 ; 1989, p. 192). Il en découle que, dans le cadre d'un tel langage formel, un énoncé comme « tous les hommes sont mortels », c'est-à-dire $(x) [("x \text{ est un homme}") \supset ("x \text{ est mortel"})]$ – où le signe « \supset » désigne, conformément à la notation qu'adoptaient Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), le connecteur d'implication –, affirme tout simplement que les valeurs de la fonction « $(x) [("x \text{ est un homme"}) \supset ("x \text{ est mortel"})]$ »,

c'est-à-dire les énoncés de la forme « ("*a est un homme*") \supset ("*a est mortel*") », sont vraies pour tout argument $a, b, c, \dots \in i$, où i est, précisément, le parcours de signification de la fonction en question, et « non pas que la fonction est vraie pour tous les arguments [c'est-à-dire pour toutes les valeurs possibles de l'argument x], puisqu'il y a des arguments pour lesquels une certaine fonction est dépourvue de sens, c'est-à-dire qu'elle n'a pas de valeurs » (« *not that the function is true for all arguments, since there are arguments for which any given function is meaningless, i. e., has no value* ») (Russell 1908, p. 236). Deuxièmement, « ces parcours de signification forment des *types* [*'types'*], c'est-à-dire que si x appartient au parcours de signification de $\varphi(x)$, alors il existe une classe d'objets [*'class of objects'*], le *type* de x , qui tous doivent appartenir au parcours de signification de $\varphi(x)$, quelle que soit la façon dont puisse varier φ ; et le parcours de signification est toujours soit d'un type unique [*'a single type'*] soit une somme de plusieurs types complets [*'a sum of several whole types'*] » (Russell 1903 ; 1989, p. 192). C'est ainsi que, « chaque fois qu'une variable apparente figure dans un énoncé, le parcours de valeurs [*'range of values'*] de la variable apparente [c'est-à-dire le domaine de cette variable] est un type [*'the range of values of the apparent variable is a type'*] » (Russell 1908, p. 236), dont la nature dépend de la fonction propositionnelle dont l'énoncé est l'une des valeurs possibles. Cela signifie que le type de l'énoncé « (x) [*("x est un homme") \supset ("x est mortel")*] » coïncide avec le parcours de valeurs de la variable x et sa nature est déterminée par celle de la fonction « ("*x est un homme*") \supset ("*x est mortel*") », en tant que fonction propositionnelle qui porte sur des individus. En conséquence, c'est précisément une telle contrainte qui a permis à Russell (1908) de reformuler le principe du cercle vicieux, qu'il avait précédemment emprunté à Poincaré (1906), comme étant un principe qui a trait au rapport entre le type d'une fonction propositionnelle, ou d'un énoncé, et celui de la variable, ou des variables, qu'elle contient, puisqu'« il faut que tout ce qui contient une variable [réelle ou apparente] ne soit pas l'une des valeurs possibles de cette variable » (« *whatever contains an apparent variable must not be a possible value of the variable* »), ce qui signifie, tout simplement, qu'il faut qu'il soit « d'un type *plus élevé* » (« *of a higher type* ») (Russell 1908, p. 237).

Il en découle que ces deux conditions sont particulièrement importantes, car elles permettent, justement, de traduire dans un langage logico-symbolique l'interdiction d'introduire, dans le système des mathématiques formellement reconstruites, des énoncés qui portent sur des totalités illégitimes, comme, par exemple, « Ω est le nombre ordinal de tous les ordinaux », « w est la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes », ou « j'affirme que les Crétois mentent toujours ». La première condition pose, en effet, une contrainte à l'ensemble des valeurs qu'une certaine fonction propositionnelle peut prendre comme arguments – ou, ce qui est équivalent, à l'ensemble des valeurs

qu'elle peut prendre elle-même— sans que l'énoncé qui en résulte perde de sens. Plus précisément, elle permet d'exclure du parcours de signification d'une formule propositionnelle « $\varphi(x)$ » – ou « $\varphi\hat{x}$ » – la formule « $\varphi(x)$ » elle-même, afin que l'on puisse considérer toute expression de la forme « $\varphi(\varphi(x))$ » comme étant dépourvue de sens. La seconde condition permet, en outre, de construire une hiérarchie de types, qui ne sont rien d'autre que les parcours de signification d'expressions de « niveaux » (« *level* »), ou d'« ordre » (« *order* »), croissant : « Commencant par [la constante individuelle, d'ordre zéro,] a et les autres termes qui peuvent être les arguments des mêmes fonctions dont a peut être un argument, nous passons aux fonctions dont a peut être un argument possible, puis aux fonctions dont ces fonctions peuvent être des arguments, etc. » (« *Beginning with a and the other terms which can be arguments to the same functions to which a can be argument, we come next to functions to which a is a possible argument, and then to functions to which such functions are possible arguments, and so on* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 285). Néanmoins, une telle hiérarchie doit nécessairement s'étager non seulement en vertical, mais également en horizontal. En effet, si l'on considère, par exemple, la fonction propositionnelle de deuxième ordre « $f(\varphi(x), x)$ » (Whitehead & Russell 1910), qui a pour arguments les valeurs de la fonction propositionnelle de premier ordre « $\varphi(x)$ » et les valeurs de la variable individuelle x , on s'aperçoit que l'on peut en dériver une autre fonction, qui a pour argument la seule variable individuelle x , tout en étant elle-même de deuxième ordre. Pour ce faire, il suffit d'introduire, par exemple, un quantificateur universel qui porte sur la fonction « $\varphi(x)$ », de telle sorte qu'elle cesse d'être une variable réelle, c'est-à-dire d'écrire « $(\varphi x) f(\varphi(x), x)$ ». Mais est-ce que cela signifierait que la fonction propositionnelle de premier ordre « $\varphi(x)$ » et la fonction de deuxième ordre « $(\varphi x) f(\varphi(x), x)$ » appartiendraient toutes les deux au même type de fonctions, et donc à la même totalité, c'est-à-dire à la totalité des fonctions qui ont pour seule variable réelle une variable individuelle ? La réponse est négative, puisque, si c'était le cas, alors la totalité des fonctions propositionnelles qui ont pour seule variable réelle une variable individuelle constituerait une totalité illégitime, car elle contiendrait une fonction qui ne se peut définir qu'en faisant référence à cette même totalité, c'est-à-dire, justement, la fonction « $(\varphi(x)) f(\varphi(x), x)$ ». C'est pourquoi il est nécessaire de limiter le parcours de valeurs de la fonction « $f(\varphi(x), x)$ » tel qu'il est déterminé par la variable « $\varphi(x)$ », de telle sorte qu'il ne puisse pas contenir la totalité des fonctions du même type que la fonction que désigne une telle variable. Cela est nécessaire afin que, lorsqu'on quantifie sur cette dernière, l'on ne finisse pas par ajouter un nouvel élément au type auquel elle appartient, c'est-à-dire, précisément, la fonction « $(\varphi(x)) f(\varphi(x), x)$ »

elle-même¹¹⁸. Il en découle que le type des fonctions telles que « $\varphi(x)$ » ne peut pas être unique, si bien que le parcours de signification d'une fonction de la forme « $f(\varphi(x), x)$ », tel qu'il est déterminé par la variable « $\varphi(x)$ », ne se compose pas d'un seul et même type, mais consiste dans la somme d'au moins deux types discrets. De manière plus générale, en s'inspirant de la formalisation complète du langage-système des *Principia Mathematica* qu'a proposée John Myhill (1974), l'on peut formaliser cette limitation du type des fonctions « $\varphi(x)$ », en tant qu'arguments possibles de fonctions d'ordre supérieur, en associant à chaque fonction que l'on peut formuler dans ce même langage-système un « type ramifié » (« *ramified type* »), qui se compose, à son tour, de deux éléments que l'on peut représenter au moyen d'un couple ordonné de nombres naturels. Le premier élément est le « type simple » (« *simple type* »), σ , de la fonction en question, qui n'est rien d'autre que son parcours de signification, c'est-à-dire l'ensemble des variables réelles qui peuvent y figurer en tant qu'arguments, et auquel on peut attribuer, de manière récursive, un nombre naturel donné : s'il s'agit d'un individu, alors $\sigma = 0$; s'il s'agit d'une fonction qui n'admet comme arguments que des variables réelles individuelles, alors $\sigma = 1$; s'il s'agit d'une fonction qui n'admet comme arguments que des variables réelles dont les valeurs sont, à leur tour, des fonctions de type simple $\sigma = 1$, alors $\sigma = 2$; s'il s'agit d'une fonction qui n'admet comme arguments que des variables réelles dont les valeurs sont, à leur tour, des fonctions de type simple $\sigma = 2$, alors $\sigma = 3$, et ainsi de suite. L'autre élément consiste, justement, dans un « ordre », ou « niveau », m , qui définit la place qu'occupe cette même fonction dans la « signature » (« *signature* ») du type simple auquel elle appartient. Plus précisément, une telle signature n'est rien d'autre qu'une série décroissante de nombres naturels m_1, \dots, m_k , telle que $k \geq 1$ et que

$$m_1 > m_2 > \dots > m_k > 0$$

(Myhill 1974, p. 21). Son but consiste précisément à distinguer les fonctions qui appartiennent à un seul et même type simple, σ , en tant que parcours de signification, en raison du type simple des variables apparentes qu'elles peuvent contenir. Plus précisément, une fonction de type ramifié $\tau =$

¹¹⁸ C'est pourquoi, comme l'explique Alonzo Church (1977), la contrainte fondamentale que la théorie des types dite « ramifiée » pose à la possibilité que une fonction propositionnelle donnée prenne telle ou telle variable comme argument consiste à exiger que « la quantification [universelle ou existentielle] sur un certain domaine (type) [de variables] » (« *quantification over any domain (type)* ») n'ajoute aucun nouveau membre à ce même domaine, « puisque l'on considère que le fait d'ajouter de nouveaux membres change la signification de la quantification sur le domaine en question de telle sorte qu'il en découle un cercle vicieux » (« *as it is held that adding new members changes the meaning of quantification over the domain in such a way that a vicious circle results* ») (Church 1977, p. 747)

(m, σ) est une fonction de type simple σ , qui occupe la place m au sein de la signature qui caractérise ce même type simple, en ceci qu'elle ne peut contenir que des variables apparentes dont le type (simple) σ est, à son tour, au plus strictement inférieur à m . Pour ne donner qu'un exemple, la fonction propositionnelle « $(\varphi x) f(\varphi(x), x)$ » est donc non seulement une fonction de deuxième ordre, mais également une fonction de type ramifié $\tau = (2, 1)$, c'est-à-dire une fonction propositionnelle dont le parcours de signification se compose de valeurs de variables individuelles et qui contient une variable apparente, c'est-à-dire « $\varphi(x)$ », qui est, elle-même, une fonction de premier ordre, alors que la fonction propositionnelle de la forme « $\varphi(x)$ » est, quant à elle, une fonction de type ramifié $\tau = (1, 1)$, c'est-à-dire une fonction propositionnelle dont le parcours de signification se compose de valeurs de variables individuelles et qui ne peut admettre que des variables apparentes qui sont, elles-mêmes, des variables individuelles. En conséquence, c'est en édifiant une hiérarchie de fonctions propositionnelles qui s'étagait sur plusieurs ordres, ou niveaux, différents et qui se ramifiait, pour chaque niveau, en plusieurs types simples, que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) visaient à résoudre les paradoxes de la théorie des ensembles, y compris le paradoxe que Russell (1903) avait lui-même découvert. Mais en quoi consistait, par conséquent, la solution qu'ils proposaient dans ce cas particulier ?

Afin de répondre à une telle question, il est nécessaire d'analyser deux autres principes qui sont introduits par Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) dans les *Principia Mathematica*, c'est-à-dire l'« axiome de réductibilité » (« *axiom of reducibility* ») et la définition du concept de « fonction dérivée » (« *derived function* ») d'une fonction propositionnelle donnée. Plus précisément, l'axiome de réductibilité affirme que,

étant donné n'importe quelle fonction [$\varphi(x)$], il y a une fonction *prédicative* [*predicative function*] [– c'est-à-dire une fonction, de type ramifié $\tau = (\sigma = n + 1, m = n + 1)$, qui n'admet que des variables apparentes dont le type simple le plus élevé est le même que le type simple le plus élevé de ses variables réelles, et qui s'écrit, par exemple, ' $\psi!(x)$ ', ou ' $\psi!\hat{x}$ ', où x est, justement, une variable de type simple $\sigma = n$ –] formellement équivalente [*formally equivalent*], c'est-à-dire qu'il y a une fonction prédicative qui est vraie quand [la proposition ' φx ' est vraie], et fausse quand [la proposition ' φx ' est fausse] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 295)¹¹⁹.

¹¹⁹ Dans la notation symbolique qu'emploient Whitehead et Russell (1910) dans les *Principia Mathematica*, l'axiome de réductibilité s'écrit, par conséquent, de la manière suivante : $\vdash : (\exists \psi) : \varphi x \equiv_x \psi! x$, ou, dans le cas de fonctions

L'une des raisons pour lesquelles cet axiome est particulièrement important consiste en ceci qu'il permet de formuler des énoncés qui portent sur des totalités légitimes, sous la forme de valeurs particulières d'un quelque prédicat (c'est-à-dire d'une quelque fonction prédicative de premier ordre) qui fait référence à une totalité de propriétés, mais de manière non circulaire. Considérons, par exemple, l'énoncé « Napoléon possède toutes les qualités qui font un grand général », que l'on peut formaliser au moyen de la formule « $(\varphi) : f(\varphi!(x)) \supset \varphi!(\text{Napoléon})$ », où la fonction « $f(\varphi!(x))$ » signifie « $\varphi!(x)$ est un prédicat qui dénote une propriété qui fait un grand général » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 296). À partir de cet énoncé, l'on peut obtenir, par généralisation (c'est-à-dire en substituant la constante « Napoléon » à la variable x), la fonction propositionnelle de deuxième ordre « $(\varphi) : f(\varphi!(x)) \supset \varphi!(x)$ », qui est « imprédicative » (« *impredicative* ») car la seule variable réelle, c'est-à-dire libre, qui y figure, x , est une variable individuelle, et donc d'ordre zéro. Il en découle que la fonction propositionnelle « $(\varphi) : f(\varphi!(x)) \supset \varphi!(x)$ » ne peut pas être considéré comme un prédicat général qui signifierait « posséder toutes les qualités qui font un grand général », puisque, si c'était le cas, il appartiendrait lui-même à la totalité des prédicats « $\varphi!(x)$ » qui désignent des qualités qui font un grand général, tout en y faisant explicitement référence dans sa définition même, ce qui rendrait cette dernière une totalité illégitime. Il en découle, ainsi, que c'est précisément la nature imprédicative de la fonction propositionnelle en question qui rend la totalité qu'elle définit une totalité illégitime (Poincaré 1906 ; Russell 1906). Il existe, néanmoins, deux manières dont nous pouvons transformer cette fonction propositionnelle imprédicative en une fonction prédicative de premier ordre, c'est-à-dire en un prédicat, qui porte sur la totalité des qualités que doit posséder un grand général : (1) nous pouvons la récrire sous la forme d'une conjonction finie – car l'on peut supposer que l'univers ne contienne qu'un nombre fini de grands généraux, et donc, également, qu'un nombre fini de propriétés qui les caractérisent – de prédicats, « $\varphi_i!(x)$ », qui dénotent chacun l'une des qualités qui font un grand général, c'est-à-dire « $(\varphi_1!(x) \wedge \varphi_2!(x) \wedge \dots \wedge \varphi_i!(x) \wedge \dots)$ », ce qui nécessite, cependant, d'accepter le présupposé qu'une conjonction (ou une disjonction) finie de fonctions propositionnelles d'un certain type est elle-même une fonction propositionnelle de ce même type, c'est-à-dire d'accepter le principe leibnizien de l'identité des indiscernables (Ramsey 1925, 1931 ; Wahl 2011)¹²⁰ ; (2) nous pouvons nous servir

propositionnelles à deux variables, $\vdash : (\exists \psi) : \varphi(x, y) . \equiv_{x, y} . \psi!(x, y)$ (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 295-296).

¹²⁰ Plus précisément, cela nécessite d'accepter le présupposé que « $(x) \varphi(x) \equiv (x)(i) (\varphi_i!(x))$ », c'est-à-dire que l'ensemble des individus qui satisfont la fonction propositionnelle « $\varphi(x)$ », et qui sont, par conséquent, identiques les uns aux autres du point de vue d'une telle fonction, n'est rien d'autre que l'ensemble des individus qui possèdent toutes les propriétés que désignent les différents prédicats « $\varphi_i!(x)$ », et qui sont donc indiscernables par rapport à la totalité de

de l'axiome de réductibilité et identifier une fonction prédicative de premier ordre « $\psi!(x)$ » telle que « $(\varphi) : f(\varphi!(x)) \supset \varphi!x . \equiv_x . \psi!x$ », et notamment telle que « $(\varphi) : f(\varphi!(x)) \supset \varphi!(Napoléon) . \equiv_x . \psi!(Napoléon)$ », c'est-à-dire identifier une sorte de prédicat qui serait représentatif de la classe de tous les prédicats qui désignent les qualités qui font un grand général et que l'on pourrait considérer comme tel précisément parce qu'il serait logiquement équivalent à la conjonction de tous les membres de cette même classe de prédicats¹²¹. Il en découle qu'une telle fonction prédicative nous permettrait de parler de l'ensemble de toutes les qualités qui font un grand général sans qu'il soit nécessaire de traiter un tel ensemble comme s'il s'agissait d'une totalité illégitime.

Quant à la définition du concept de fonction dérivée, son but est de résoudre un problème crucial auquel doit faire face toute tentative de définir les concepts mathématiques en termes de fonctions propositionnelles d'ordre supérieur au premier, c'est-à-dire la nature « extensionnelle » (« *extensionality* ») des premiers par opposition au caractère « intensionnel » (« *intensional* ») des secondes (Ramsey 1925, 1931). En d'autres termes, d'un point de vue logique, les concepts mathématiques ne se définissent pas par rapport à des prédicats, en tant que fonctions propositionnelles qui énoncent telle ou telle propriété d'un certain nombre d'objets. Bien au contraire, ils se définissent relativement à des extensions, c'est-à-dire relativement à des classes d'objets (voire à des relations en tant que classes de couples, de triplets, etc., d'objets) dont les membres peuvent satisfaire ou ne pas satisfaire une fonction à n places qui correspondre à tel ou tel prédicat n -aire¹²².

ces mêmes prédicats. Afin que l'on puisse vérifier l'indiscernabilité de deux individus quelconques, il est donc nécessaire que le nombre de prédicats en question soit fini.

¹²¹ Comme l'observaient Whitehead et Russell (1910) eux-mêmes, il en découle que « l'axiome de réductibilité est équivalent à la supposition que 'n'importe quelle combinaison ou disjonction de prédicats est équivalente à n'importe quel prédicat unique' [*to the assumption that 'any combination or disjunction of predicates is equivalent to a single predicate'*], c'est-à-dire à la supposition que si nous affirmons que x a tous les prédicats qui satisfont une fonction [*'f($\varphi!(x)$)'*], il y a un prédicat que x aura chaque fois que notre affirmation sera vraie, et qu'il n'aura pas chaque fois que notre affirmation sera fausse [*'a there is some one predicate which x will have whenever our assertion is true, and will not have whenever it is false'*] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 299).

¹²² « Les nombres réels sont définis comme des segments de rationnels [*'segments of rationals'*], tout segment de rationnels est un réel [*'any segment is a real number'*] et il y en a 2^{\aleph_0} . Il n'est pas nécessaire que le segment soit défini par une propriété ou un prédicat quelconque de ses membres, en quelque sens ordinaire de prédicat que ce soit [*'It is not necessary that the segment should be defined by any property or predicate of its members in any ordinary sense of predicate'*]. Un nombre réel est donc une extension et il peut même être une extension sans intension correspondante [*'an extension with no corresponding intension'*]. De la même manière, une fonction d'une variable réelle est une relation en extension [*'a function of a real variable is a relation in extension'*], qui n'a nul besoin d'être donnée par une relation réelle ou par une formule [*'by any real relation or formula'*] » (Ramsey 1925 ; 2003, p. 81).

C'est pourquoi, comme l'expliquait justement Ramsey (1925, 1931) les énoncés mathématiques « affirment [, justement,] des relations entre extensions » (« *assert relations between extensions* ») (Ramsey 1925, 1931 ; 2003, p. 82), alors que les fonctions propositionnelles d'ordre supérieur au premier sont, par définition, « des fonctions de vérité » (« *truth-functions* ») (Ramsey 1925, 1931 ; 2003, p. 75) de fonctions prédicatives de premier ordre. Cela signifie que les fonctions propositionnelles d'ordre supérieur sont essentiellement des fonctions de prédicats et c'est précisément pour une telle raison que l'on peut en conclure qu'elles expriment des relations entre intensions, c'est-à-dire entre des propriétés qui sont exprimées, justement, par les prédicats eux-mêmes. Il s'ensuit que, afin de pouvoir réduire des concepts et des énoncés mathématiques à des fonctions propositionnelles d'ordre supérieur au premier sans se heurter à d'importantes difficultés techniques¹²³, il est nécessaire d'exprimer de telles fonctions sous la forme de fonctions

¹²³ Pour ne faire qu'un exemple, considérons la manière dont Dedekind (1871) a construit l'ensemble des nombres réels, \mathbb{R} , à partir de l'ensemble des nombres rationnels, \mathbb{Q} , telle que la présente Walter Rudin (1964) dans ses *Principles of mathematical analysis (Principes d'analyse mathématique)*. Plus précisément, Rudin (1964) reconstruit l'argument de Dedekind (1871) en huit étapes, dont la première consiste à définir les éléments de \mathbb{R} comme étant « certains sous-ensembles de \mathbb{Q} » (« *certain subsets of \mathbb{Q}* »), $\alpha \subset \mathbb{Q}$, qui sont appelés « coupures » (« *Schnitte* », « *cuts* ») (Rudin 1964, p. 17) et qui remplissent trois conditions fondamentales :

- (I) α n'est pas vide [*'not empty'*] et $\alpha \neq \mathbb{Q}$.
- (II) Si $p \in \alpha$, $q \in \mathbb{Q}$, et $q < p$, alors $q \in \alpha$.
- (III) Si $p \in \alpha$, alors $p < r$ pour quelques $r \in \alpha$,

où p , q et r sont des nombres rationnels quelconques (Rudin 1964, p. 17). Comment pourrait-on donc reconstruire cette première étape du raisonnement de Dedekind (1871) en utilisant des fonctions propositionnelles ? En première approximation, nous pouvons reconstruire ces énoncés dans un langage de la logique prédicative du troisième ordre de la manière suivante :

$$(\exists x) \{ [(x \subset \mathbb{Q}) \wedge (x \neq \emptyset) \wedge (x \neq \mathbb{Q}) \wedge \forall p, q \in \mathbb{Q} [(p \in x \wedge q < p) \rightarrow q \in x] \wedge \forall p \in \mathbb{Q} [p \in x \rightarrow \exists r \in x (p < r)]] \rightarrow (x \in \mathbb{R}) \}$$

où x est, dans ce cas, une variable de classe, que l'on pourrait réduire à une variable de fonction prédicative de premier ordre qui a des variables d'individus pour arguments, alors que p , q et r sont, elles-mêmes, des variables d'individus. À partir de cet énoncé, nous pouvons obtenir, par généralisation (c'est-à-dire en éliminant le quantificateur existentiel qui porte sur x et en remplaçant les constantes de classes \emptyset et \mathbb{Q} par des variables du même type, y et z), une fonction propositionnelle prédicative de troisième ordre, au sens de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), « $F!(e!(x, z), f!(x, y), g!(x, z), h!(x, z), i!(x)) = [e!(x, z) \wedge f!(x, y) \wedge g!(x, z) \wedge h!(x, z)] \rightarrow i!(x)$ », où « $e!(x, z) = (x \subset z)$ », « $f!(x, y) = (x \neq y)$ », « $g!(x, z) = (x \neq z)$ », « $h!(x, z) = \forall p, q \in z [(p \in x \wedge q \in z \wedge q < p) \rightarrow q \in x] \wedge$

extensionnelles. Plus précisément, telles que les définissaient Whitehead et Russell (1910) des fonctions propositionnelles extensionnelles d'ordre supérieur au premier sont des fonctions dont la « valeur de vérité pour un argument quelconque est identique pour n'importe quel autre argument formellement équivalent » (« *its truth-value with any argument is the same as with any formally equivalent argument* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 318), si bien que leurs intensions – c'est-à-dire les propriétés qu'elles attribuent, en tant que fonctions de vérité d'ordre supérieur au premier, à leurs propres arguments – coïncident nécessairement avec leurs extensions – c'est-à-dire avec les classes d'arguments qui les satisfont –, puisqu'elles attribuent une seule et même propriété à des arguments qui appartiennent à une seule et même classe de prédicats (ou de fonctions de prédicats), définie par une relation d'équivalence formelle qui n'est rien d'autre qu'une relation de co-extensionnalité, car « quand deux fonctions sont formellement équivalentes, il est possible de dire qu'elles ont la même extension » (« *when two functions are formally equivalent, we may say that they have the same extension* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 319). En conséquence, c'est précisément dans le but de montrer en quoi il serait toujours possible de transformer une fonction propositionnelle en une fonction extensionnelle que Whitehead et Russell (1910) introduisent, dans les *Principia Mathematica*, le concept de fonction dérivée d'une fonction propositionnelle donnée. Plus précisément, une fonction dérivée est, elle-même, une fonction propositionnelle qui est dénotée par l'expression « $f\{\hat{x}(\varphi x)\}$ » et qui « est définie de la manière suivante : étant donné une fonction [$f(\psi!(x))$], notre fonction dérivée doit être 'il y a une fonction prédicative [c'est-à-dire ' $\psi!(x)$ '] qui est formellement équivalente [*'formally equivalent'*] à [$\varphi(x)$] et qui satisfait f » (Whitehead &

$\forall p \in z [p \in x \rightarrow \exists r \in x (p < r)]$ et $i!(x) = (x \in \mathbb{R})$ » sont, toutes les cinq, des fonctions prédictives de second ordre. Les valeurs possibles de « $F!(f!(x, y), g!(x, z), h!(x, z), i!(x))$ » sont, en conséquence, des énoncés tels que « $[e!(a, c) \wedge f!(a, b) \wedge g!(a, c) \wedge h!(a, c)] \rightarrow i!(a)$ », où « a », « b » et « c » sont des constantes de classes quelconques. Néanmoins, comme l'observerait Ramsey (1925), ce même énoncé contient des énoncés plus élémentaires, tels que, précisément, « $f!(a, b) = (a \neq b)$ » ou « $g!(a, c) = (a \neq c)$ », qui « ne sont [pourtant] nullement de véritables propositions » (Ramsey 1925 ; 2003, p. 82), car ils se limitent, dans cet exemple, à décrire le fait que le signe « a » est différent du signe « b », ou que le signe « a » n'est pas le même signe que « c ». Leur fonction consiste, par conséquent, à stipuler une convention symbolique, et non pas à affirmer un fait, si bien qu'il faudrait les considérer comme étant des règles de substitution, plutôt que de véritables énoncés. Une telle confusion est, précisément, la conséquence du fait que, d'un point de vue purement mathématique, « $(x \neq y)$ » et « $(x \neq z)$ » sont des fonctions extensionnelles, qui énoncent les faits que deux classes d'objets ne sont pas superposables, alors que, du point de vue de la logique prédictive, on est obligé de les considérer comme s'il s'agissait de fonctions propositionnelles intensionnelles, dont le rôle consisterait à décrire le « fait logique » (« *logical fact* »), pour utiliser les mots mêmes de Russell (1918) et de Wittgenstein (1922), que les objets qui peuvent être dénotés, de manière sensée, par les variables x , y et z possèdent telle ou telle propriété.

Russell 1910 ; Russell 1989, p. 320). Dans la notation des *Principia Mathematica*, nous pouvons exprimer une telle définition comme suit :

$$f\{\hat{x}(\varphi x)\} . = : (\exists \psi) : \varphi x . \equiv_x . \psi! x : f\{\psi!(x)\} \quad Df$$

(Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 323). Autrement dit, écrire « $f\{\hat{x}(\varphi x)\}$ » signifie, justement, affirmer qu'« il y a une fonction prédicative [$\psi!(x)$] qui est formellement équivalente à [$\varphi(x)$] et qui est telle que [$f(\psi!(x))$] est vrai » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 323). Il en découle que la fonction dérivée d'une fonction prédicative est toujours extensionnelle, d'après les définitions mêmes des concepts d'équivalence formelle entre fonctions propositionnelles et de fonction extensionnelle que donnaient Whitehead et Russell (1910). Mais qu'est-ce que dénote son argument, « $\hat{x}(\varphi x)$ » ?

Un tel argument dénote précisément l'extension de la fonction propositionnelle « $\varphi(x)$ », c'est-à-dire « la classe des arguments qui satisfont [$\varphi(x)$] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 322), mais non pas en tant qu'objet, pour ainsi dire, « à part entière » de l'univers du discours du langage formel des *Principia Mathematica*. Bien au contraire, le signe « $\hat{x}(\varphi x)$ » désigne l'extension de la fonction « $\varphi(x)$ » en tant qu'opération qui consiste à établir une relation d'équivalence formelle, et donc, comme nous l'avons vu plus haut, de co-extensionnalité, entre cette dernière et une certaine fonction prédicative « $\psi!(x)$ ». Afin de mieux éclairer ce point, nous pouvons considérer la définition de « l'opérateur laplacien » (« *Laplace operator* ») « nabla carré », « ∇^2 », d'une fonction quelconque, c'est-à-dire

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad Df$$

(Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 309). Cette définition ne décrit pas le sens du signe « ∇^2 », dans le sens où elle ne décrit pas la classe d'objets que désigne ce dernier. Bien au contraire, elle se limite uniquement à déterminer la manière dont on peut utiliser le signe « ∇^2 » pour accomplir une certaine opération mathématique – notamment, pour calculer la divergence du gradient de la fonction en question (Hecht 1999)¹²⁴. De manière analogue, la définition de la fonction dérivée d'une

¹²⁴ Plus précisément, le gradient d'une fonction scalaire à trois variables, $T(x, y, z)$, est un vecteur à trois dimensions que l'on peut considérer comme étant une généralisation du concept de dérivée, c'est-à-dire $\vec{\nabla}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{x} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{y} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{z}$, dont les composantes sont, justement, les dérivées partielles de la fonction T dans les trois directions ($\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$). Un tel vecteur est

fonction propositionnelle « $\varphi(x)$ » ne décrit pas le sens du signe « $\hat{x}(\varphi x)$ », mais seulement la manière dont on peut s'en servir pour établir la relation formelle dont nous avons parlé plus haut. Il en découle que Whitehead et Russell (1910) considéraient le signe de la classe qui est définie par la fonction « $\varphi(x)$ », « $\hat{x}(\varphi x)$ », comme étant un « symbole incomplet » (« *incomplete symbol* ») – au même titre que des « descriptions » (« *descriptions* ») telles que l'expression « carré rond » (« *round square* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 309)¹²⁵ – c'est-à-dire « un symbole qui n'est

orienté dans la direction de croissance maximale de la fonction T et sa norme, $\|\vec{\nabla}T\|$, n'est rien d'autre que le taux de croissance de cette même fonction dans une telle direction (Griffiths 1999, p. 13-14). La divergence d'une fonction vectorielle, \vec{v} , donnée est, en revanche, la valeur scalaire qui résulte de l'application de l'opérateur vectoriel $\vec{\nabla}$ à cette même fonction, par le biais du produit scalaire \cdot . Par conséquent, $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \left(\vec{x} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{y} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot (v_x \vec{x} + v_y \vec{y} + v_z \vec{z}) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ n'est rien d'autre qu'une mesure du degré d'« étalement » (c'est-à-dire, précisément, de divergence) des vecteurs définis par la fonction \vec{v} par rapport à un point donné dans l'espace (Griffiths 1999, p. 17-18).

¹²⁵ Dans les *Principia Mathematica*, Whitehead et Russell (1910) dressent une distinction entre les « noms propres » (« *proper names* »), en tant qu'expressions qui désignent un certain objet et qui ont, par conséquent, une signification qui leur est propre, indépendamment de tout contexte, et les « descriptions » (« *descriptions* »), qui sont, au contraire, dépourvues de toute signification indépendante. Le terme « Socrate » est, par exemple, un nom propre, en ceci qu'il désigne un être humain, si bien que, lorsque nous l'utilisons dans le contexte d'un énoncé tel que « Socrate est mortel » (« *Socrates is mortal* »), nous ne sommes pas en train d'en préciser la signification, mais de décrire un fait logique dont l'objet qu'il désigne est, justement, un constituant (« *constituent* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 309). L'expression « carré rond » est, en revanche, une description, car elle ne désigne aucun objet réellement existant, si bien que, lorsque nous affirmons que « le carré rond n'existe pas » (« *the round square does not exist* »), nous sommes tout simplement en train d'affirmer que « l'énoncé 'il existe un objet c dont on peut dire qu'il est à la fois rond et carré et qui est tel que, s'il existe un autre objet dont on peut dire la même chose, cet autre objet est nécessairement le même objet que c ' est faux ». Autrement dit, l'expression « le carré rond » n'est rien d'autre qu'une locution qui nous permet de remplacer, justement, l'énoncé que nous venons de déclarer faux par une expression plus synthétique et c'est précisément dans un tel sens que sa signification est purement contextuelle. En notation symbolique, la forme logique de l'énoncé « le carré rond n'existe pas » est donc la suivante :

$$\sim E!(\exists x) (\varphi x)$$

(Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 310), qui signifie, justement, « le x satisfaisant la propriété ' $\varphi(x)$ ' n'existe pas », où la propriété en question est celle d'être, à la fois, carré et rond. Le « sujet grammatical » (« *grammatical subject* ») d'un tel énoncé est, par conséquent, $(\exists x) (\varphi x)$, quoique, dans ce cas particulier, un tel sujet ne désigne, comme nous venons de le voir, aucun objet. Cela signifie que nous pouvons analyser l'énoncé en question, afin de le réduire à une formule qui ne contienne que des termes qui dénotent des objets ou qui décrivent des propriétés d'objets. C'est précisément en effectuant une telle analyse que nous obtenons l'affirmation « l'énoncé 'il existe un objet c dont on peut

supposé avoir aucun sens isolément et qui n'est défini que dans certains contextes » (« *a symbol which is not supposed to have any meaning in isolation, but is only defined in certain contexts.* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 309). Cela signifie que tout symbole de classe ne dénoterait aucune chose réellement existante, si bien qu'il disparaîtrait chaque fois que l'énoncé dans lequel il figure serait complètement « analysé » (« *analysed* ») (Russell 1918)– c'est-à-dire traduit en un énoncé qui exprime les relations qui existent entre des signes logiques qui dénotent, de manière directe, des objets réels –, si bien que les classes, en tant que collections d'objets, ne seraient, en vérité, que des « quasi-choses » (« *quasi-things* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 329). De telles considérations valent également pour les relations lorsqu'on les considère d'un point de vue extensionnel, c'est-à-dire en tant que classes de n -uplets d'objets, puisque, d'un tel point de vue, ces dernières « sont, au même titre que les classes, des symboles incomplets » (« *Relations in extension, like classes, are incomplete symbols* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 330). C'est ainsi que Whitehead et Russell (1910) pouvaient définir le concept de « relation (en extension) déterminée par [la fonction propositionnelle à deux variables] $\varphi(x, y)$ » (« *relation (in extension) determined by (x, y)* ») de la manière suivante, c'est-à-dire en l'associant au symbole incomplet « $\hat{x}, \hat{y}\varphi(x, y)$ » :

$$f\{\hat{x}, \hat{y}\varphi(x, y)\}. = : (\exists \psi) : \varphi(x, y) . \equiv_{x,y} . \psi! (x, y) : f\{\psi! (x, y)\} \quad Df$$

(Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 330). Tout comme dans le cas du symbole de la classe définie par la fonction « $\varphi(x)$ », écrire « $f\{\hat{x}, \hat{y}\varphi(x, y)\}$ » signifie, en conséquence, affirmer qu'il y a une fonction prédicative à deux arguments, « $\psi! (x, y)$ » qui est formellement équivalente à la fonction propositionnelle, toujours à deux arguments, « $\varphi(x, y)$ », et qui est telle que « $f(\psi! (x, y))$ » est vrai, si bien que, de même que la fonction dérivée « $f\{\hat{x}\varphi(x)\}$ » est toujours une fonction extensionnelle de « φ », « $f\{\hat{x}, \hat{y}\varphi(x, y)\}$ » est toujours une fonction extensionnelle de « φ », quand

dire qu'il est à la fois rond et carré et qui est tel que, s'il existe un autre objet dont on peut dire la même chose, cet autre objet est nécessairement le même objet que c ' est faux », ou, en notation symbolique,

$$\sim\{(\exists c) : \varphi x. \equiv_x . x = c\}$$

(Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 310). Nous pouvons donc remarquer que, une fois que l'énoncé a été entièrement analysé, le pseudo-sujet grammatical (x) (φx) a disparu. C'est précisément le fait qu'on puisse reformuler un énoncé tel que « le carré rond n'existe pas » d'une telle manière que l'expression « le carré rond » puisse en être éliminée qui nous démontre qu'il s'agit bien d'une description et non pas d'un nom propre.

bien même « $\psi!(x, y)$ » ne le serait pas (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 330). Il s'ensuit que toute variable de classe ou de relation qui figure dans une fonction propositionnelle donnée peut être remplacée par une variable de fonction, respectivement à un ou à plusieurs arguments, pourvu que l'on puisse montrer que la fonction propositionnelle au sein de laquelle on opère le remplacement n'est rien d'autre qu'une fonction dérivée d'au moins l'une des valeurs du parcours de vérité de la variable de fonction en question, ou, plus précisément, pourvu que l'on puisse montrer, par exemple, que

$$(\exists \alpha) f\alpha = (\exists \varphi) f\{\hat{x}(\varphi x)\} \quad Df$$

(Linsky 2002, p. 398), ou que

$$(\exists \beta) f\beta = (\exists \varphi) f\{\hat{x}, \hat{y}\varphi(x, y)\} \quad Df$$

où α est, précisément, une variable de classe, alors que β est une variable de relation à deux places (c'est-à-dire dyadique). En conséquence, c'est précisément pour de telles raisons que le concept de fonction dérivée ne permet pas seulement de résoudre le problème que représentait, pour le logicisme, l'extensionnalité des concepts et des énoncés mathématiques, mais également d'apporter une solution à la question des totalités illégitimes, tout comme l'axiome de réductibilité. Il nous permet, en effet, de considérer « la totalité des *classes* auxquelles un terme peut appartenir » (« *the totality of the classes to which a given term can be significantly said to belong* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 322) comme étant une totalité légitime, puisqu'elle se définit par rapport aux fonctions que le terme en question peut satisfaire « de manière sensée » (« *meaningfully* »), ce qui élimine toute circularité vicieuse. De plus, un tel concept implique également que « si, avec un argument donné [φx], la fonction [$f(\varphi(x))$] ainsi interprétée est équivalente à [$f(\psi!(x))$] chaque fois que [$\psi!(x)$] est formellement équivalent à [$\varphi(x)$], alors [$f\{\hat{x}(\varphi x)\}$] est équivalent à [$f(\varphi(x))$] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 321). Cela signifie, tout simplement, que, afin que l'on puisse réduire la classe définie par la fonction « $\varphi(x)$ » à la fonction « $\varphi(x)$ » elle-même, il faut et il suffit qu'il existe une fonction prédicative « $\psi!(x)$ » qui est formellement équivalente à « $\varphi(x)$ », ce qui est garanti par l'axiome de réductibilité. De plus, encore une fois, les mêmes conclusions s'appliquent également aux relations prises au sens extensionnel, c'est-à-dire en tant que classes d' n -uplets d'objets. Il en découle, ainsi, que la définition même du concept de fonction dérivée et l'axiome de réductibilité nous permettent d'en conclure « qu'une proposition portant sur une classe [*a proposition about a class*] doit toujours être réduite à un énoncé portant

sur une fonction qui définit cette classe [*'a statement about a fonction which defines the class'*], c'est-à-dire sur une fonction qui est satisfaite par tous les membres de la classe et par aucun autre argument [*'a fonction which is satisfied by the members of the class and by no other arguments'*] » (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 304). Cela dit, en quoi ces deux principes ont-ils concrètement donné à Whitehead et Russell (1910) les moyens conceptuels de proposer une solution au paradoxe de la classe de toutes les classes qui ne sont pas membres d'elles-mêmes ?

Afin de répondre à une telle question, il suffit d'observer que c'est précisément à partir du présupposé que tout énoncé qui porte sur une classe donnée se réduit à un énoncé qui porte sur la fonction propositionnelle qui la définit que, toujours dans les *Principia Mathematica*, Whitehead et Russell (1910) formulent leur solution au paradoxe que Russell (1903) avait lui-même découvert quelques années auparavant. La définition même du concept de fonction dérivée et l'axiome de réductibilité nous permettent d'en conclure, en effet, que « chaque classe peut être définie au moyen d'une fonction *prédicative* » (« *every class can be defined by a predicative function* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 322), c'est-à-dire d'une fonction qui n'admet que des variables, réelles ou apparentes, dont le type simple est strictement inférieur au sien. Une fonction de cette nature ne peut, par conséquent, pas devenir son propre argument, sous peine d'enfreindre l'une des propriétés fondamentales de la théorie des types logiques. Il en découle que la possibilité de réduire toute classe à une fonction prédicative qui la décrit implique que la classe en question « ne peut ni satisfaire ni ne pas satisfaire » (« *either satisfies nor does not satisfy* ») une telle fonction, précisément parce que cette dernière n'appartient pas à son propre parcours de signification. C'est à partir de là que l'on peut en conclure qu'une telle classe « n'est ni un membre d'elle-même, ni pas un membre d'elle-même » (« *therefore...is neither a member of itself nor not a member of itself.* ») (Whitehead & Russell 1910 ; Russell 1989, p. 304), ce qui élimine le paradoxe de Russell (1903). En conséquence, c'est en procédant de cette manière que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont pu montrer en quoi il était possible de se servir d'une théorie des classes telle que la théorie des types logiques, dite « ramifiée » (« *ramified* ») – en tant que théorie qui réduit les classes à des fonctions propositionnelles qui appartiennent à un système hiérarchique de parcours de signification qui se subdivisent, à leur tour, en ensembles d'arguments qui sont accessibles à différentes fonctions d'un seul et même type – , et d'axiomes logiques tels que l'axiome de réductibilité non seulement afin de résoudre les paradoxes que soulevaient les premières formulations de la théorie des ensembles, mais également afin de reconstruire l'axiomatisation de l'arithmétique qu'avait formulée Peano (1889). Par ce même

biais, ils ont donc réussi à prolonger l'œuvre de Frege (1884, 1893)¹²⁶, dont le projet logiciste de refondation de l'arithmétique et de réduction du concept de nombre au concept de classe se fondait précisément sur le présupposé que l'on pouvait admettre l'existence de classes définies par des fonction propositionnelles arbitraires, si bien qu'il avait été mis à mal par la découverte du paradoxe de Russell (1903) (Feferman 2005). Nous pouvons donc en conclure que ce sont précisément les conditions formelles qui constituent les deux principes fondamentaux de la théorie des types logiques et des axiomes tels que l'axiome de réductibilité qui traduisent, chez Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), la thèse syntaxique et la thèse sémantique qui caractérisaient le programme logiciste dans son ensemble, c'est-à-dire l'idée qu'il serait possible d'attribuer une signification logique à des concepts mathématiques, et notamment à des concepts considérés comme étant primitifs, en analysant la structure et les propriétés logiques de ce même concept par le biais d'un langage logiquement parfait. D'une part, la théorie des types logiques, dite « ramifiée », représente, ainsi, la structure logique du langage formel des *Principia Mathematica* en tant que langage logiquement parfait, c'est-à-dire en tant que langage qui permet d'éliminer toute ambiguïté dans l'usage des signes logiques, et notamment toute ambiguïté liée aux définitions imprédicatives et aux totalités illégitimes qu'elles décrivent, alors que, d'autre part, l'axiome de réductibilité constitue un principe logique qui permet, précisément, d'interpréter les concepts que mobilisent des énoncés mathématiques tels que la

¹²⁶ Plus précisément, afin d'expliquer le concept de nombre naturel en termes logiques, ils ont repris à leur compte la définition frégréenne de « nombre cardinal d'une classe α » (« *cardinal number of a class α* ») comme étant « la classe de toutes les classes qui sont similaires à α » (« *the class of all the classes that are similar to α* »), en ceci qu'ils estimaient qu'il était possible d'en déduire toutes les « propriétés formelles » (« *formal properties* ») des nombres cardinaux et qu'elle leur permettait de ne pas avoir à considérer le concept de nombre cardinal d'une classe comme étant « indéfinissable » (« *indefinable* ») (Whitehead & Russell 1912, p. 4). Dans la notation symbolique des *Principia Mathematica*, le nombre cardinal d'une classe α s'écrit donc

$$Nc'\alpha = \hat{\beta}(\beta \text{ sm } \alpha)$$

où « $Nc'\alpha$ » est l'expression qui dénote le nombre en question, alors que « $\hat{\beta}(\beta \text{ sm } \alpha)$ » dénote la classe de toutes les classes qui satisfont la fonction propositionnelle « $(\beta \text{ sm } \alpha)$ », c'est-à-dire, justement, « la classe β est similaire à la classe α ». L'expression

$$NC = \hat{\mu}\{(\exists \alpha) . \mu = Nc'\alpha\}$$

désigne, en revanche, « la classe des objets qui sont les nombres cardinaux de quelque chose [*the class of objects which are the cardinal numbers of something or other*]', c'est-à-dire des objets qui, pour quelque α que ce soit, sont égaux à $Nc'\alpha$ » (Whitehead & Russell 1912, p. 4-5).

définition du nombre 1 de manière purement logique, en réduisant de tels concepts aux extensions de fonctions prédicatives. Néanmoins, ce sont toujours les principes fondamentaux de la théorie des types, dite « ramifiée », et l'axiome de réductibilité qui nous montrent, également, les faiblesses de la manière dont Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ont réinterprété, dans les *Principia Mathematica*, les thèses du logicisme. Mais en quoi consistent, par conséquent, de telles faiblesses ? Afin de répondre à cette question, nous pouvons remarquer que les résultats obtenus par les deux auteurs des *Principia Mathematica* sont généralement considérés comme n'étant pas satisfaisants, en ceci que la théorie des types, dite « ramifiée » (« *ramified* »), en conjonction avec l'axiome de réductibilité et les autres axiomes dont se sont servis Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), ne constituerait qu'une solution *ad hoc* aux problèmes que représente l'existence de totalités illégitimes pour l'élaboration d'une théorie logique des classes, si bien que c'est la théorie axiomatique des ensembles de Zermelo (1908) qui a fini par être élevée au rang de véritable théorie des classes en tant que fondements des objets et des concepts mathématiques (Linsky 2002, 2011, 2013 ; Irvine & Deutsch 2020). Mais en quoi de telles objections pourraient-elles être justifiées ?

En ce qui concerne l'axiome de réductibilité, par exemple, Ramsey (1925, 1931) a observé, en développant une remarque qui avait déjà été faite par Wittgenstein (1922)¹²⁷, que ce dernier ne peut pas être considéré comme étant un principe logique, à proprement parler, puisqu'il ne consiste pas dans un énoncé tautologique. Il est, en effet, tout à fait possible de penser un monde où il existerait « une infinité de fonctions atomiques » (« *an infinity of atomic functions* »), « $\varphi_i!(x)$ » – c'est-à-dire, précisément, de ce que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) appelaient des « fonctions prédicatives de premier ordre » – telles que, étant donné deux individus « *a* » et « *b* », l'énoncé « $\varphi_i!(a) = \varphi_i!(b)$ » soit vrai pour toute valeur de *i*, sauf un. Si c'était le cas, « $(\varphi). \varphi! x \equiv \varphi! a$ ne pourrait être équivalent à aucune fonction élémentaire de *x* » (« *could not be equivalent to any elementary function of x* ») (Ramsey 1925, 1931 ; 2003, p. 117). Il s'ensuit qu'il faudrait considérer l'axiome de réductibilité comme étant plutôt un principe « empirique » (« *empirical* ») (Ramsey 1925, 1931), c'est-à-dire un axiome qui postulerait l'existence d'un certain objet mathématique

¹²⁷ « 6.1232 – La validité générale logique [*'general validity of logic'*], on pourrait la nommer essentielle [*'essential'*], par opposition à l'accidentelle, comme par exemple, dans la proposition : 'Tous les hommes sont mortels.' [*'the accidental general validity of such propositions as 'All men are mortal'*"] Des propositions comme l'axiome de réductibilité de Russell ne sont pas des propositions logiques, et ceci explique le sentiment que nous avons que, si elles sont vraies, elles ne sauraient l'être que par un heureux hasard [*'their truth could only be the result of a fortunate accident'*] » ; « 6.1233 – Un monde dans lequel l'axiome de réductibilité ne vaudrait pas est pensable. Mais il est clair que la logique n'a rien à voir avec la question de savoir si notre monde est ou n'est pas réellement ainsi [*'logic has nothing to do with the question whether our world really is like that or no'*] » (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 100).

(notamment d'une fonction prédicative de premier ordre qui serait formellement équivalente à une certaine fonction propositionnelle de n'importe quel ordre). Nous pouvons donc en déduire que, afin de contourner le problème que posait la nécessité d'énoncer des propriétés spécifiques pour les fonctions propositionnelles qui relèvent de types ramifiés différents, en faisant dépendre ainsi des lois logiques d'autres lois logiques (Wittgenstein 1922), Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) auraient introduit, *ad hoc*, dans leur système un axiome qui permet de réduire des fonctions de n'importe quel ordre à des fonctions de premier ordre, mais dont la nature mathématique comporterait une pétition de principe : autrement dit, afin de pouvoir fonder la théorie des ensembles sur des principes logiques, sous la forme d'une théorie des classes, Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) auraient été contraints d'introduire dans le système logique des *Principia Mathematica* un axiome qui relèverait lui-même d'une théorie des ensembles à peine déguisée en logique prédicative, comme le soutenait, d'ailleurs, Quine (1970). Quant à la structure de la théorie des types en tant que telle, en revanche, il est possible, comme l'observe Gödel (1944) dans un article consacré à la logique mathématique de Russell, de l'envisager comme étant la conséquence d'un autre présupposé d'existence, ou plutôt de non-existence, c'est-à-dire comme consistant tout simplement dans un prolongement de « la théorie sans classes » (« *no-class theory* ») dont parle Russell (1906) lui-même dans son article de 1906 et que Gödel (1944) résumait de la manière suivante : la réduction des classes à des fonctions propositionnelles impliquerait que « les classes ou les concepts n'existent *jamais* en tant qu'objets réels [*'never exist as real objects'*], et que les énoncés qui contiennent les termes correspondants n'ont de sens que dans la mesure où l'on peut les interpréter comme étant une *façon de parler* d'autres choses [*'as a façon de parler, a manner of speaking about other things'*] » (Gödel 1944, p. 133). Autrement dit, Gödel (1944) voyait dans la théorie des types logiques de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) un langage-système qui incarnait une vision « constructiviste » (« *constructivism* »), ou « nominaliste » (« *nominalism* »), des concepts et des objets mathématiques, puisque, à son avis, ce serait précisément une conception de cette nature qui nécessiterait l'élimination des fonctions imprédicatives, dans le but d'éviter de tomber dans un cercle vicieux lorsqu'on définit tel ou tel objet en présupposant l'existence de la totalité à laquelle il appartient, avant que cette dernière n'ait été logiquement construite (Gödel 1944, p. 132-133). C'est ainsi que Gödel (1944) opposait une telle conception à une vision « réaliste » (« *realism* »), d'après laquelle toute fonction propositionnelle que l'on pourrait utiliser pour définir, par exemple, le nombre 2 en tant que classe de tous les paires ne serait qu'une manière parmi d'autres de décrire « une seule et même 'forme' ou 'nature' commune à tous les paires » (« *one common 'form' or 'nature' of all pairs* ») (Gödel 1944, p. 138), c'est-à-dire, précisément, le nombre 2 en tant que concept ou objet mathématique qui existerait indépendamment de toute formulation linguistique, si bien qu'il ne serait pas nécessaire de le construire à partir des

éléments dont il se compose, mais seulement de le décrire par rapport à ces derniers¹²⁸. En conséquence, toujours d'après Gödel (1944), c'est précisément faute d'avoir accepté l'idée que les classes, en tant qu'objets mathématiques, peuvent exister indépendamment des prédicats (et plus généralement des fonctions propositionnelles) qui en décrivent les propriétés¹²⁹ que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) avaient été contraints de bâtir un enchevêtrement de fonctions propositionnelles où, afin d'éviter toute forme de circularité vicieuse, des fonctions d'un certain ordre sont définies par rapport à des variables d'un ordre inférieur, si bien que la construction logique des secondes doit toujours précéder celle des premières. Cela les avait, cependant, amenés à adopter, justement, l'axiome de réductibilité, qui est nécessaire pour que l'on puisse concevoir l'existence, dans un système structuré en types ramifiés, de propriétés logiques qui s'appliquent à toute sorte

¹²⁸ « Il semble, par conséquent, que le principe du cercle vicieux...soit valide seulement si l'on adopte le point de vue constructiviste (ou nominaliste) en ce qui concerne les objets de la logique et des mathématiques [*'if one takes the constructivistic (or nominalistic) standpoint toward the objects of logic and mathematics'*], et tout particulièrement les propositions, les classes et les notions [*'propositions, classes and notions'*], par exemple, si, par notion, l'on entend un symbole qui est associé à une règle de traduction d'énoncés qui contiennent le symbole en question en énoncés qui sont tels qu'ils ne le contiennent pas [*'a symbol together with a rule for translating sentences containing the symbol into such sentences as do not contain it'*], si bien que tout objet qui soit séparément dénoté par ce même symbole ne semble être qu'une simple fiction [*'a mere fiction'*]. Il se peut, néanmoins, que les classes et les concepts soient également conçus comme étant des objets réels [*'as real objects'*], et notamment que les classes soient conçues comme étant des 'pluralités de choses' [*'namely classes as 'plurality of things''*] ou des structures qui se composent d'une pluralité de choses [*'as structures consisting of a plurality of things'*] et que les concepts soient conçus comme étant les propriétés d'objets et les relations entre objets qui existent indépendamment de nos définitions et de nos constructions [*'concepts as the properties and relations of things existing independently of our definitions and constructions'*] » (Gödel 1944, p. 136-137).

¹²⁹ Comme l'observe Gödel (1944) lui-même, des propriétés « φ » telles que l'énoncé « $\varphi(a)$ » « consiste en un certain état de choses qui concerne toutes les propriétés [*'a certain state of affairs involving all properties'*] (y compris φ elle-même et des propriétés qui sont définies en termes de φ)...devront nécessairement se contenir elles-mêmes en tant que constituants de leur contenu [ou de leur signification] [*'contain themselves as constituents of their content [or of their meaning]'*]...mais cela ne fait que rendre impossible la construction de leur signification (c'est-à-dire que cela nous empêche d'en expliquer la signification comme assertion qui porte sur des perceptions sensibles ou sur toute autre entité non-conceptuelle) [*'to construct their meaning (i.e. explaining it as an assertion about sense perceptions or any other non-conceptual entities)'*], ce qui ne constitue aucunement une objection pour celui qui adopte un point de vue réaliste [*'a realist standpoint'*]. Il n'est pas non plus contradictoire qu'une partie propre doive être identique (non pas tout simplement égale) à la totalité [*'a proper part should be identical (not merely equal) to the whole'*], comme c'est le cas pour les structures au sens abstrait du terme [*'structures in the abstract sense'*]. La structure des séries de nombres entiers [*'the structure of the series of integrals'*] se contient, par exemple, elle-même en tant que partie propre et l'on peut facilement observer qu'il existe également des structures qui contiennent une infinité de parties différentes [*'infinitely many different parts'*], dont chacune contient, à son tour, la structure entière en tant que partie [*'the whole structure as a part'*] » (Gödel 1944, p. 139).

d'arguments et à toute sorte de fonctions propositionnelles, mais qui présuppose, à son tour, soit l'existence des classes, soit l'existence d'« une infinité de *'qualitates occultae'* » (« *infinitely many 'qualitates occultae'* ») (Gödel 1944, p 152), c'est-à-dire l'existence d'une fonction prédicative de premier ordre dont il faudrait supposer, comme le faisaient Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) eux-mêmes, qu'elle serait équivalente à une conjonction de fonctions du même type, sans que l'on puisse, néanmoins, avoir la certitude qu'une telle conjonction sera nécessairement finie, contrairement à ce que supposaient, encore une fois, ces derniers. En effet, si l'on veut construire un langage formel qui soit le plus général possible, il est nécessaire d'admettre qu'il puisse parler d'un nombre infini d'objets. Dans un tel langage, il serait, par conséquent, entièrement possible que la conjonction de fonctions propositionnelles dont il faudrait se servir pour décrire une propriété telle que celle de posséder toutes les propriétés qui font un grand général prenne la forme d'une conjonction infinie de prédicats dont il serait difficile, au vu de leur nombre, de connaître la forme logique exacte – alors que, comme l'écrivait Wittgenstein (1922), « il ne peut *jamais* y avoir de surprises en logique » (« *there can never be surprises in logic* ») (Wittgenstein 1922 ; 1993, p. 101) –, d'où l'infinité de « qualités occultes » à laquelle faisait référence Gödel (1944). Autrement dit, dans la lecture que donnait Gödel (1944) des *Principia Mathematica*, la théorie des types, dite « ramifiée », de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) ne serait rien d'autre qu'une manière de résoudre le problème des totalités illégitimes tout en contournant la nécessité d'adhérer à une conception réaliste des objets et des concepts mathématiques. Il n'en demeure pas moins vrai, poursuivait-il, que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) auraient pourtant fini, en adoptant cette solution *ad hoc*, par formuler un axiome (c'est-à-dire l'axiome de réduction) dont l'interprétation la plus cohérente présupposerait, justement, une telle forme de réalisme mathématique.

Comme a pu l'observer Russell Wahl (2011), de telles critiques à l'égard de la théorie des types, dite « ramifiée », et de l'axiome de réductibilité ont amené les commentateurs des *Principia Mathematica* à développer au moins deux interprétations alternatives de cette même théorie, qui sont, justement, l'une nominaliste et l'autre réaliste. Plus précisément, d'après l'interprétation nominaliste (Landini 1998), la réduction des catégories aux fonctions propositionnelles qui les décrivent impliquerait l'élimination des premières, si bien qu'il faudrait comprendre la théorie des types et des ordres de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) comme étant « une théorie du symbolisme, et non pas du symbolisé » (« *a theory of the symbolism, not the symbolized* ») (Wahl 2011, p. 49), c'est-à-dire comme étant une théorie qui ne présuppose pas l'existence, dans la pensée ou dans le monde, d'une multiplicité d'entités de types différents, mais tout simplement l'existence, dans le symbolisme lui-même, de « variables structurées » (« *structured variables* ») dont il faut expliciter les règles de substitution, c'est-à-dire les règles qui permettent de les remplacer, de manière purement formelle,

par d'autres variables ou par des constantes. Selon l'interprétation réaliste (Goldfarb 1989 ; Hylton 1990 ; Linsky 1999, 2002 ; Mares 2007), en revanche, il faudrait envisager la réduction des catégories aux fonctions propositionnelles non pas de manière éliminativiste, mais de manière constructiviste, dans un sens du terme qui est, néanmoins, différent de celui que lui attribue Gödel (1944) dans son écrit sur la logique mathématique de Russell¹³⁰. Autrement dit, d'après cette autre interprétation du système formel des *Principia Mathematica*, il s'agirait de se servir des fonctions propositionnelles pour construire logiquement les classes en tant que réseaux de relations métaphysiques entre objets, c'est-à-dire ni en tant qu'objets dotés d'existence propre, tels les individus que dénotent les variables et les constantes individuelles, ni en tant que pures fictions intellectuelles, mais en tant qu'« entités structurées » (« *structured entities* ») en parties constituantes (Wahl 2011, p. 53)¹³¹. Il en découle

¹³⁰ Comme l'explique Philippe de Rouilhan (1996), il est, en effet, possible d'identifier au moins trois formes de constructivisme chez Russell : « 1 / Le constructivisme logique, ou *constructivisme₁*, qui pousse Russell, à partir de 1905 et 1906, à remplacer les entités douteuses (paradigmatiquement les classes) par des constructions logiques (c'est l'idée de la *no-classes theory*), et qui trouvera son expression radicale, à partir de 1914, dans la « maxime suprême de la philosophie scientifique » : « Partout où c'est possible, aux entités inférés, il faut substituer des constructions logiques » [Russell (1914)]. 2/ Le constructivisme dont il s'agit [dans l'article de 1908], ou *constructivisme₂*, c'est-à-dire la théorie d'après laquelle 'une fois 'donnés' les individus, et distingués parmi eux les concepts (plus précisément les prédicats, les relations binaires, les relations ternaires, etc.), la totalité de la hiérarchie se 'construit' pas à pas, de façon unique. Les propositions élémentaires sont les propositions que l'on peut 'construire' à partir des individus par application itérée des opérations de prédication, négation, implication, substitution, *et rien de plus* ; les propositions de premier ordre s'obtiennent en ajoutant aux opérations précédentes celle de généralisation sur des variables d'individus, *et rien de plus*. L'idée d'une proposition du premier ordre qui serait 'donnée', pour ainsi dire, sans être 'construite' à partir des individus comme il a été dit est exclue'. 3/ Le constructivisme comme doctrine bien connue du statut ontologique des objets abstraits, ou *constructivisme₃*, selon lequel ces objets n'existent pas indépendamment de nous et ne sont que des constructions mentales, et que l'on oppose classiquement au réalisme (ou 'platonisme'), et auquel Russell est toujours resté parfaitement étranger » (de Rouilhan 1996, p. 216-217). de Rouilhan (1996) précise en outre « qu'en 1906, la hiérarchie des types était *constructive₁* ; maintenant, en 1908, elle est *constructive₂* ; elle ne sera jamais *constructive₃* » (de Rouilhan 1996, p. 217). Sur la base de cette distinction conceptuelle, l'on peut donc en conclure que, comme le suggère Wahl (2011) lui-même, l'interprétation réaliste que donne, par exemple, Linsky (1999, 2002) du « constructivisme » de la théorie des types dans les *Principia Mathematica* correspond au « *constructivisme₂* » au sens de de Rouilhan (1996), alors que Gödel (1944) considérait que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) s'étaient servis du « *constructivisme₂* » comme d'un simple prolongement du *constructivisme₁* » dans le but de traduire en termes logico-linguistiques des positions ontologiques proches du *constructivisme₃* ».

¹³¹ Comme le suggère Wahl (2011) lui-même, la différence entre la conception nominaliste, c'est-à-dire comme variables structurées, et la conception réaliste, c'est-à-dire comme entités structurées, des classes correspond à la différence entre deux théories de la quantification, à savoir la théorie de la « quantification substitutionnelle » (« *substitutional quantification* ») et la théorie de la « quantification objectuelle » (« *objectual quantification* »). D'un point de vue substitutionnel, l'énoncé « $(\exists x) (x \text{ est } F)$ » « est vrai pourvu que l'une de ses instances substitutionnelles [*substitutional*

qu'une interprétation réaliste des *Principia Mathematica* consiste à envisager la théorie des types de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) comme étant une tentative de reformuler le concept de classe en tant que construction logique, édifiée sur la base d'atomes logiques – c'est-à-dire de propositions et de fonctions prédicatives de premier ordre –, dans le but de pouvoir déduire quelques théorèmes fondamentaux des mathématiques – et notamment de l'arithmétique et de l'analyse – à partir d'un certain nombre d'axiomes, sur le modèle de la manière dont Russell (1918) lui-même envisageait les objets physiques comme étant des « 'constructions logiques' sur la base de données sensorielles » (« *'logical constructions' from sense data* »), dans le but de pouvoir déduire quelques « faits évidents au sujet de la matière » (« *neat facts about matter* ») (Linsky 2002, p. 397) – tels que le fait que deux corps ne peuvent pas occuper la même position au même moment – à partir de lois plus générales, de nature hypothétique. Cela dit, par-delà toutes les questions philosophiques et techniques qui animent les débats autour des différentes interprétations du langage-système des *Principia Mathematica*, nous pouvons en conclure, sur la base des analyses que nous venons de mener, que les thèses syntaxiques et sémantiques au sujet de la reconstruction formelle des mathématiques qui caractérisaient le programme logiciste, du moins telles qu'elles ont été développées par Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), ont soulevé deux problèmes majeurs, l'un de nature logico-linguistique et l'autre de nature ontologico-épistémologique. D'un point de vue logico-linguistique, les *Principia Mathematica* ont soulevé, justement, la question de savoir en quoi devrait consister la structure d'un langage formel qui permettrait de reconstruire les fondements des mathématiques, dites « classiques », et quels sont les axiomes que comporte cette dernière. D'un point de vue ontologico-épistémologique, ils ont

instances'] [c'est-à-dire l'un des énoncés que l'on peut obtenir en substituant une certaine constante '*a*' à la variable *x*] soit vraie [conformément aux contraintes que posent le vocabulaire, ainsi que les règles syntaxiques et sémantiques du langage formel en question] », alors que, d'un point de vue objectuel, ce même énoncé est vrai pourvu que le prédicat « est *F* » « soit vrai d'un quelque objet qui existe dans le domaine [d'application] du quantificateur » (« *is true of some object in the domain of the quantifier* ») (Richard 1998, p. 7088). Les mêmes considérations s'appliquent également au quantificateur universel. Ces deux conceptions de la quantification comportent, par conséquent, des conditions de vérité pour les énoncés quantifiés qui sont différentes. D'un point de vue substitutionnel, l'énoncé « $(\exists x)$ (*x* est un animal mythologique) » est vrai si le vocabulaire du langage formel en question contient le nom d'un animal mythologique, comme, par exemple, « Pégase », et comporte des règles syntaxiques et sémantiques permettant d'assigner un tel nom au prédicat « est un animal mythologique » de telle sorte que l'énoncé qui en résulte soit vrai. D'un point de vue objectuel, cet énoncé est vrai pourvu qu'il existe un animal mythologique dans le domaine d'application du quantificateur en question, si bien que, si un tel domaine coïncide avec notre univers physique, cet énoncé doit être considéré comme faux, car aucun animal mythologique n'y existe vraiment (Richard 1998, p. 7088). L'on peut donc en conclure que l'interprétation nominaliste de la théorie des types correspond à une conception substitutionnelle de la quantification sur les individus et les fonctions propositionnelles, alors que l'interprétation réaliste correspond à une conception objectuelle de la quantification, du moins en ce qui concerne les individus et les fonctions propositionnelles de premier ordre.

soulevé la question de savoir en quoi consistent les entités conceptuelles dont il serait nécessaire de supposer l'existence, toujours dans le but de reconstruire les fondements des mathématiques, ainsi que de savoir de quelle manière l'on pourrait espérer connaître les propriétés qui caractérisent ces mêmes entités. De surcroît, les arguments de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) nous permettent également de mettre l'accent sur le fait que ces deux questions sont inextricablement liées l'une à l'autre, en ceci que la structure logique et les axiomes que l'on choisira pour tel ou tel langage formel, dans le but de reconstruire tel ou tel domaine des mathématiques, finiront par déterminer, du moins en partie, la nature ontologique et épistémologique des entités dont ce même langage présupposera l'existence, et inversement. En conséquence, c'est précisément au prisme du lien qui existe entre ces deux questions que l'on peut interpréter les débats autour des fondements des mathématiques qui ont vu les logicistes s'opposer non seulement aux formalistes de l'école hilbertienne, comme nous l'avons vu plus haut, mais également aux thèses « intuitionnistes » (« *intuitionism* ») (Carnap 1939, p. 48-51) que prônaient des mathématiciens tels que L. E. J. Brouwer (1912, 1913, 1923, 1930), Hermann Weyl (1918, 1921, 1926), Arend Heyting (1930, 1934, 1956), ainsi que, quoique seulement en partie, Henri Poincaré (1902, 1906). Par conséquent, en quoi ces autres courants dans l'histoire de la pensée mathématique, et notamment le courant formaliste, ont-ils tâché d'apporter des réponses aux questions logiques et ontologico-épistémologiques qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica* ? Quels sont les problèmes que de telles réponses ont fini par poser, en retour, aux membres du Cercle de Vienne et, plus généralement, aux empiristes logiques ?

2.2 Le programme formaliste de l'école hilbertienne et la synthèse entre logicisme et intuitionnisme : comment pourrait-on construire un formalisme mathématique universel ?

Comme nous l'avons vu plus haut, l'analyse des paradoxes auxquels s'étaient heurtées les premières tentatives de développer la théorie des ensembles sur la base du système des nombres transfinis de Cantor (1883) avaient mené Henri Poincaré (1906) à récuser, justement, l'usage du concept d'infini mathématique en acte qu'avait fait ce dernier. Une telle conclusion s'inscrivait, néanmoins, dans une critique plus large des solutions que les logicistes avaient eux-mêmes apportées à de tels paradoxes, et notamment dans une critique des différentes théories des définitions prédicatives qu'avait esquissées Russell (1906) dans son article de 1906. En quelques mots, nous pouvons résumer la position de Poincaré (1906) de la manière suivante : au vu de l'impossibilité d'identifier des règles formelles infaillibles – ce dont témoigne l'existence même de contradictions

telles que le paradoxe de Russell (1903) ou celui de Burali-Forti (1897) –, il est nécessaire de reconnaître le rôle fondamental que joue l'intuition dans la pensée mathématique, en ceci que les objets et les propositions qui en constituent les différentes branches, et notamment l'arithmétique, ne sont rien d'autre que des produits de « la faculté de créer des symboles » qui caractérise l'esprit humain (Poincaré 1902 ; 2014, p. 55). La preuve en serait, toujours d'après Poincaré (1902), le fait que le principe même du raisonnement par induction finie, ou mathématique, c'est-à-dire le principe d'après lequel « *Si un théorème est vrai pour le nombre 1, si on a démontré qu'il est vrai de $n + 1$, pourvu qu'il le soit de n , il sera vrai de tous les nombres entiers positifs* » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 74), constituerait un axiome que l'on ne saurait réduire à des principes logiques plus fondamentaux – comme, par exemple, les règles formelles du raisonnement déductif¹³² – en ceci qu'il ne serait rien d'autre que « l'affirmation d'une propriété de l'esprit lui-même » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 55). C'est précisément pour une telle raison que Poincaré (1902) le considérait comme étant « un véritable jugement synthétique *à priori* » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 74) qui était, néanmoins, spécifique aux mathématiques, car, comme l'explique Michael Detlefsen (1992), sa conception du savoir reposait sur une sorte de « principe de conservation épistémique » (« *principle of epistemic conservation* »), d'après lequel « l'inférence ne peut pas être *épistémiquement* 'créative' – c'est-à-dire qu'elle ne peut produire de la connaissance d'une certaine nature que si elle constitue elle-même une connaissance de cette nature » (« *inference cannot be epistemically 'creative' – that is, that it cannot give rise to knowledge belonging to a given type unless it itself constitutes knowledge of that type* ») (Detlefsen 1992, p. 351). En conséquence, c'est précisément à partir du présupposé qu'il existerait une forme de raisonnement intuitif qui serait, à la fois, irréductible à toute formalisation et spécifiquement mathématique que Poincaré (1902, 1906) a développé une critique des solutions logicistes aux

¹³² Plus précisément, Poincaré (1902) estimait que la réduction analytique du principe d'induction mathématique à une chaîne de règles d'inférence formelle, notamment de règles syllogistiques, ne pouvait que s'appliquer aux propriétés de l'infini mathématique en puissance : « Il est facile maintenant de comprendre pourquoi toute conséquence particulière d'un théorème peut, comme je l'ai expliqué plus haut, être vérifiée par des procédés purement analytiques. Si au lieu de montrer que notre théorème est vrai de tous les nombres, nous voulons seulement faire voir qu'il est vrai du nombre 6 par exemple, il nous suffira d'établir les 5 premiers syllogismes de notre cascade ; il nous en faudrait 9 si nous voulions démontrer le théorème pour le nombre 10 ; il nous en faudrait davantage encore pour un nombre plus grand ; mais quelque grand que ce soit ce nombre nous finirions toujours par l'atteindre, et la vérification analytique serait possible » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 39). Dès qu'il était question de l'infini en acte, en tant qu'objet mathématique, il était, à son avis, nécessaire d'avoir recours au principe d'induction : « Et cependant, quelque loin que nous allions ainsi, nous ne nous élèverions jamais jusqu'au théorème général, applicable à tous les nombres, qui seul peut être objet de science. Pour y arriver, il faudrait une infinité de syllogismes, il faudrait franchir un abîme que la patience de l'analyste, réduit aux seules ressources de la logique formelle, ne parviendra jamais à combler » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 39-40).

« paradoxes cantorians » (Poincaré 1906) qui a été ensuite reprise, dans ses grandes lignes, par le mathématicien hollandais L. E. J. Brouwer (1908). Ce dernier considérait, justement, que ces mêmes paradoxes « naissent là où la régularité du langage qui accompagne les mathématiques est étendue à un discours composé de mots mathématiques que n'accompagne pas de mathématique » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 20), c'est-à-dire lorsqu'on essaie de réduire les symboles et les énoncés des mathématiques à ceux d'un langage « logiquement parfait » comme celui que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) avait développé dans les *Principia Mathematica*. C'est pourquoi il estimait, en revanche, que « tous les paradoxes s'évanouissent si on se borne à parler de systèmes explicitement constructibles moyennant l'intuition originare, *i.e.* si, au lieu de faire présupposer la logique par les mathématiques, on fait présupposer les mathématiques par la logique » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 20).

Dans un article datant de 1908 et consacré aux raisons pour lesquelles on ne peut pas se fier aux principes logiques, Brouwer (1908) explique donc que si, d'une part, personne ne saurait contester la validité générale du « principe du syllogisme » et du « principe de contradiction », d'autre part, la même chose ne vaut pas pour « le principe du tiers exclu », puisqu'il « exige que toute hypothèse soit vraie ou non-vraie » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 21), c'est-à-dire puisqu'il repose sur le présupposé qu'il n'existerait pas de problèmes mathématiques insolubles, comme le prétendait, justement, Hilbert (1901). Se servir du principe du tiers exclu, tel que le présentait Brouwer (1908), afin de démontrer la vérité d'un certain énoncé mathématique signifie, en effet, construire des systèmes « bien déterminés » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 21) d'objets mathématiques qui s'emboîtent les uns dans les autres, dans le but de s'assurer que, à chaque nouvel emboîtement, l'on puisse toujours vérifier que les éléments du nouveau système ainsi créé possèdent la propriété, ou les propriétés, que décrit l'énoncé en question, et cela sur la base du présupposé qu'il sera toujours possible de mener à bien une telle construction, à moins que l'énoncé dont on veut démontrer la vérité ne soit falsifié à une étape donnée, ce qui implique, précisément, qu'il n'existerait aucun énoncé pour lequel on ne pourrait pas parvenir à une démonstration de sa vérité, ou de sa fausseté, pourvu que l'on procède d'une telle manière. Brouwer (1908) maintenait, en revanche, qu'un tel présupposé ne saurait être justifié qu'au cas où l'on aurait affaire soit à des emboîtements de « systèmes finis discrets », soit à des systèmes infinis que l'on pourrait, néanmoins, construire à partir de systèmes finis en se servant du principe de « l'induction complète », « moyennant un invariant sur une suite dénombrablement infinie » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 21). Il ajoutait, ensuite, que, dans ce second cas de figure, il serait toujours nécessaire que le système infini en question ait effectivement été construit, avant que l'on puisse y appliquer le principe du tiers exclu,

car la totalité des systèmes qu'on peut développer à partir du problème considéré [c'est-à-dire à partir de la question de savoir si l'énoncé dont on veut démontrer la vérité est, effectivement, vrai] est dénombrablement inachevée, et il n'est par conséquent pas possible de procéder à une recherche méthodique à priori, touchant la présence ou l'absence d'un système qui déciderait le problème » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 21).

Cela signifie, tout simplement, que Brouwer (1908) estimait qu'il serait impossible d'exclure *a priori* la possibilité que l'on trouve un jour une méthode de construction permettant d'embrasser la totalité du « système dénombrablement inachevé des développements possibles » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 22) du problème en question et de démontrer, par ce même biais, que ce même problème est, en vérité, indécidable. Dans une telle perspective, la vérité d'énoncés qui ont joué un rôle déterminant dans l'élaboration de la théorie des nombres transfinis, tels que, par exemple, le principe d'après lequel « chaque nombre est ou bien fini ou bien infini » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 22) ne saurait être démontrée *a priori*, c'est-à-dire de manière analytique, car une telle démonstration nécessiterait, précisément, l'application du principe du tiers exclu à un système d'objets mathématiques qui serait dénombrablement inachevé et pour lequel il faudrait, en revanche, trouver, avant toute chose, une méthode (synthétique) de construction¹³³. C'est pourquoi Brouwer (1908) pouvait en conclure que « lorsqu'il s'agit des constructions et des transformations mathématiques pures [par opposition à celles qui relèvent de la logique symbolique] », l'on ne saurait « négliger provisoirement la représentation du système mathématique qu'on a édifié, et se mouvoir à l'intérieur de la construction linguistique d'accompagnement » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 20) – c'est-à-dire dans le langage formel dont on peut se servir pour systématiser les énoncés et les démonstrations mathématiques –, en espérant compter sur la validité de principes logiques tels que celui du tiers exclu afin d'obtenir le même degré de certitude auquel on peut parvenir lorsqu'on s'appuie, toujours dans le but de démontrer la vérité ou la fausseté de tel ou tel énoncé mathématique,

¹³³ Comme l'expliquait Brouwer (1908) lui-même, un tel principe repose sur le présupposé que « pour chaque nombre γ on peut construire soit une représentation de γ en totalité sur la suite des nombres entiers de telle manière qu'un nombre α de cette suite soit le dernier (les nombres $\alpha + 1$, $\alpha + 2$, $\alpha + 3$..., restant libres) ; soit une représentation de γ en totalité ou en partie sur la suite des nombres entiers dans sa totalité » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 22), c'est-à-dire, précisément, sur le présupposé de la possibilité *a priori* de l'application du principe du tiers exclu à la totalité des nombres entiers. Brouwer (1908) regardait un tel présupposé comme étant fallacieux, car, afin de pouvoir le mettre à l'épreuve, il faudrait montrer en même temps « le caractère contradictoire de la suite $\beta + 1$, $\beta + 2$, $\beta + 3$..., qui reste libre, et le caractère contradictoire de son caractère contradictoire », alors que ces derniers ne peuvent, justement, « jamais se présenter ensemble » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 22 n13), en ceci que la représentation du second découle toujours de celle du premier.

sur « la représentation des constructions mathématiques concrètes » (Brouwer 1908 ; Largeault 1992, p. 20) dont est capable notre esprit.

De surcroît, alors que Poincaré (1902, 1906) était beaucoup plus libéral dans son refus de l'application *a priori* de principes logiques au raisonnement mathématique et de l'acceptation du concept d'infini en acte lorsqu'il s'agissait de sa propre pratique de mathématicien (Feferman 2005)¹³⁴, Brouwer (1923) était prêt à traduire ses positions philosophiques au sujet de la nature du savoir mathématique en théorèmes et en démonstrations. Pour ne faire qu'un exemple, dans un article datant de 1923 et consacré au rôle du principe du tiers exclu dans la « *théorie des fonctions réelles*, issue principalement des travaux de l'école de Paris » (« *die (hauptsächlich aus der Pariser Schule hervorgegangene) Theorie der reellen Funktionen* ») (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 200), Brouwer (1923) s'attelle à falsifier deux énoncés que l'on peut considérer comme étant au fondement d'une telle théorie et qui découlent, justement, du principe du tiers exclu. Le premier énoncé est un théorème d'existence qui affirme que « toute fonction continue $f(x)$ partout définie à l'intérieur d'un intervalle fermé i possède un maximum [*Jede in einem geschlossenen Intervall i überall bestimmte stetige Funktion $f(x)$ besitzt ein Maximum,*'], i.e. il y a une valeur d'abscisse x_1 et un voisinage [*'Umgebung'*] α de x_1 tel que $f(x_1) \geq f(x)$ pour tout x appartenant à l'intersection de α et de i » (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 201). L'autre énoncé consiste, en revanche, dans le « théorème du recouvrement de Heine-Borel » (« *Heine-Borelscher Überdeckungssatz* »), d'après lequel « si à chaque noyau de points de la species¹³⁵ de points [*'Punktspezies'*] A formée des points et des points-limites d'une species de points entière bornée B , on assigne un voisinage, alors il est possible de

¹³⁴ Comme le relevait Brouwer (1952) lui-même, « quand il s'agit de développer les mathématiques plus avant, [les pré-intuitionnistes tels que Poincaré, Borel et Lebesgue] persistent à appliquer sans restriction la logique classique, principe du tiers exclu compris. Ils le faisaient sans avoir égard au fait que la non-contradiction des systèmes ainsi construits était devenue fort douteuse après la découverte des antinomies logico-mathématiques » (Brouwer 1952 ; Largeault 1992, p. 448).

¹³⁵ Comme le rappelle W. P. van Stigt (1990), le concept de « sorte » (« *sort* ») ou « species » (« *species* ») a été introduit par Brouwer (1917) comme équivalent « constructiviste » du concept classique de propriété, dans le but de permettre aux mathématiciens d'avoir recours à l'hypothèse et à la généralisation en tant qu'« étapes de construction légitimes » (« *legitimate constructive steps* ») (van Stigt 1990, p. 336), sans qu'ils doivent nécessairement présupposer l'existence d'un « univers platonicien » (« *platonian universe* ») où les propriétés des objets mathématiques existeraient séparément de la construction de ces derniers, en tant que substances. Dans ses articles plus tardifs, Brouwer (1947, 1948, 1952, 1954) décrit les species comme étant les propriétés dont on peut supposer qu'elles soient concrètement possédées par des entités mathématiques que l'on a déjà construites, qui constituent ainsi « les éléments de la species » (« *the elements of the species* ») en question (van Stigt 1990, p. 336), et qu'elles puissent être héritées par toutes les entités que l'on pourra construire, par la suite, en prolongeant le même processus génétique.

recouvrir toute la species A par un nombre fini de ces voisinages » (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 201). Dans les deux cas, Brouwer (1923) démontre la fausseté de l'énoncé en question en construisant des séquences tout au plus « dénombrablement achevées » d'objets mathématiques et en itérant, de manière récursive, une telle construction jusqu'à obtenir un contre-exemple. Son but est de montrer en quoi c'est précisément le recours à des principes logiques de portée infinie, que l'on a admis comme étant valides *a priori*, qui conduit les mathématiciens à l'erreur, puisque la seule méthode sûre d'effectuer une démonstration mathématique consisterait, à son avis, à « tester » (« *prüfen* ») – c'est-à-dire soit à « prouver » (« *beweisen* »), soit à « réduire à l'absurde » (« *ad absurdum führen* ») – les propriétés mathématiques que l'on souhaite étudier en les construisant en tant que propriétés de systèmes secondaires d'un « système principal » fini spécifié (« *ein bestimmtes endliches „Hauptsystems“* ») d'objets mathématiques (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 197), c'est-à-dire en tant que « possibilités d'appliquer des systèmes [secondaires] sur d'autres systèmes [secondaires] selon des règles de correspondance entre leurs éléments » (« *Abbildbarkeiten von Systemen auf andere Systeme mit vorgeschriebenen Elementkorrespondenzen* ») (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 197), du moment que toutes ces possibles applications sont en nombre fini, et donc concrètement testables. C'est ainsi que, en ce qui concerne le premier énoncé, Brouwer (1923) construit un système qui consiste en une suite infinie et décroissante, $\delta_1, \delta_2, \dots$, de « fractions dyadiques irréductibles » (« *irreduzible Dualbrüche* ») – c'est-à-dire de nombres rationnels qui peuvent s'écrire sous la forme de fractions dont le dénominateur est une puissance de 2 – comprises entre 0 et 1, extrémités exclues. Il définit, ensuite, une fonction $f_n(x)$ qui « pour $x = \delta_n$ a la valeur 2^{-n} , s'annule pour $x = 0$ et pour $x = 1$, tandis qu'elle est linéaire entre $x = 0$ et $x = \delta_n$ de même qu'entre $x = \delta_n$ et $x = 1$ » (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 201). Par ce même biais, il construit différents voisinages possibles, α , au sein de l'intervalle unitaire fermé $[0,1]$, qui sont centrés, respectivement, sur les points $x = \delta_1, x = \delta_2$, etc., et dont chacun est associé à un certain membre de la suite de fonctions $f_1(x), f_2(x), \dots$, qui ne possèdent pas de maximum dans les voisinages qui leur correspondent. Cette série constitue, par conséquent, une règle de correspondance permettant d'appliquer ces différents voisinages, où la fonction $f_n(x)$ n'admet pas de maximum, sur la totalité de l'intervalle unitaire fermé, si bien que, afin de construire un contre-exemple pour le théorème d'après lequel toute fonction continue, partout définie dans ce même intervalle, possède une valeur maximale, il suffit d'identifier une autre fonction, $g(x)$, qui soit continue, qui soit partout définie dans $[0,1]$, et qui consiste, en quelque sorte, dans la somme des différentes fonctions $f_1(x), f_2(x), \dots$. Pour ce faire, Brouwer (1923) définit, ainsi, une fonction $g(x)$ de la manière suivante :

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} g_n(x), \text{ où } g_n(x) = \begin{cases} f_n(x) & \text{si } n = k_1 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

et k_1 est un entier naturel ainsi défini : « $[m = k_1]$ lorsque dans la continuation [du développement en fraction décimale de π], il arrive en d_m [c'est-à-dire à la m -ième chiffre après la virgule] pour la [première] fois que le segment $d_m d_{m+1} \dots d_{m+9}$ présente la suite 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 » (Brouwer 1923 ; Largeault 1992, p. 200). Il en découle que la fonction $g(x)$, toujours ainsi définie, représente une règle d'application du voisinage qui correspond à $x = \delta_{k_1}$ sur la totalité de l'intervalle unitaire fermé. De surcroît, une telle règle prend la forme d'une fonction continue qui est partout définie dans ce même intervalle, mais qui ne possède pas de valeur maximale, ce qui constitue, précisément, un contre-exemple pour le théorème en question. Cela dit, en quoi la conception des mathématiques que défendaient les intuitionnistes constituerait une réponse aux questions logico-linguistiques et ontologico-épistémologiques, au sujet des fondements des mathématiques, qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica* ? En quoi une telle réponse serait-elle alternative aux positions des logicistes ? En quoi aurait-elle influencé les solutions que le programme formaliste de l'école hilbertienne a essayé d'apporter à ces mêmes problématiques ? En quoi consistent les problèmes que cette école a-t-elle fini par léguer au courant du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique ?

Afin de répondre à ces questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.2.1), en quoi les intuitionnistes ont développé une conception de la reconstruction formelle du savoir mathématique qui s'opposait point par point au programme logiciste. Plus précisément, elle se fondait sur un présupposé, de nature logico-linguistique, consistant à envisager les mathématiques comme un champ d'activités mentales essentiellement non linguistiques, ainsi que sur un présupposé, de nature ontologico-épistémologique, d'après lequel les objets mathématiques ne seraient que de libres produits de l'esprit humain faisant l'objet d'une connaissance purement intuitive, et non pas logico-déductive. Cela nous permettra de mettre au jour la manière dont, face aux options alternatives que constituaient le logicisme et l'intuitionnisme, l'école formaliste de Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) a essayé d'effectuer une synthèse entre les deux, qui consistait à axiomatiser et à formaliser les énoncés des mathématiques classiques sans essayer pour autant de les interpréter en termes purement logiques. Ses membres estimaient, en effet, qu'il fallait se concentrer sur les aspects syntaxiques du système que constituaient de tels énoncés, et plus précisément qu'il était nécessaire d'établir une démonstration de sa consistance par l'intermédiaire d'une théorie métamathématique finitiste. En conséquence, c'est précisément dans une telle synthèse que consistait la réponse que l'école hilbertienne a fini par apporter à la question logico-linguistique et à la question ontologico-épistémologique qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica*. Cela dit, en quoi une telle réponse

était-elle liée à l'extension du programme hilbertien non seulement à l'ensemble des sciences mathématiques, mais également aux pans les plus mathématisés des sciences de la nature ? Afin de répondre à cette autre question, nous verrons, dans un second moment (section 2.2.2), en quoi Hilbert (1928) lui-même envisageait sa propre approche de la reconstruction formelle des mathématiques par analogie avec la démarche inductive des physiciens. Plus précisément, Hilbert (1928) considérait la métamathématique contentuelle et finitiste comme constituant une base inductive qui permettrait, à la fois, de formuler et de contrôler les axiomes des mathématiques formelles et que l'on pourrait, ainsi, considérer comme étant analogues aux lois physiques (Mancosu 2001). L'on peut, en outre, déceler un parallèle similaire entre la démarche du mathématicien et celle du physicien dans les cours que Hilbert (1905) tint, en 1905, au sujet du concept même d'axiomatisation. Nous verrons donc en quoi, dans ces mêmes cours, Hilbert (1905) présente l'axiomatisation des mathématiques et l'axiomatisation des sciences physiques comme étant parfaitement complémentaires, en ceci que la première nécessitait d'être ancrée dans des intuitions empiriques fondamentales, alors que la seconde reposait sur la démarche analytique propre, justement, à la première. Il en découle que le premier problème que l'école hilbertienne a légué à la tradition de l'empirisme logique consistait dans la possibilité d'étendre la démarche axiomatique, telle que l'envisageait Hilbert (1899, 1901, 1905) lui-même, aux sciences empiriques sans estomper les caractéristiques qui les distinguent des sciences formelles. Ce premier problème était, en outre, lié à un autre, qui venait des implications du second théorème, dit « d'incomplétude », de Gödel (1931) pour la conception hilbertienne de la métamathématique. Plus précisément, Gödel (1931) avait montré que si un système formel de l'arithmétique – tel que l'axiomatisation de Peano (1889) ou le système des *Principia Mathematica* – est consistant, alors il est impossible de fournir une démonstration métamathématique de ce fait, du moins si l'on se limite à utiliser, au niveau métamathématique, des règles d'inférence finitistes et contentuelles – comme celles qui caractérisent, précisément, le système de Peano (1889). C'est ainsi que son théorème a fini par poser à nouveaux frais le problème de l'élaboration d'un formalisme qui soit propre à la totalité du corps des connaissances mathématiques et qui prenne la forme d'un langage-système permettant aux mathématiciens d'exploiter la puissance et la portée inférentielle des principes transfinis, tels que le principe mathématique de l'induction transfinie ou le principe logique du tiers exclu, tout en évitant de tomber dans des paradoxes. Telles sont, en conséquence, les problématiques que le Cercle de Vienne et l'empirisme logique ont hérité du programme formaliste hilbertien.

2.2.1 De l'analyse logique des concepts mathématiques aux preuves de consistance des systèmes de formules : le programme formaliste comme cadre métamathématique

Alors que les logicistes considéraient qu'il serait possible de reconstruire les mathématiques sous la forme d'un système axiomatique de formules relevant d'un langage formel « logiquement parfait », en réduisant, par ce même biais, les concepts mathématiques à des concepts purement logiques, il n'en était pas de même pour les intuitionnistes tels que Brouwer (1912, 1913, 1923, 1930), Weyl (1918, 1921, 1926) et Heyting (1930, 1934, 1956), puisque ces derniers récusait toute tentative de remplacer le contenu d'énoncés mathématiques concrets par quelque formalisme logique que ce soit, ainsi que de substituer à l'intuition mathématique l'application d'un ensemble de règles formelles. Ils regardaient le savoir mathématique non pas comme un système formalisé, mais comme « un champ d'activités mentales fondé sur l'« intuition pure » » (« *a field of mental activities based upon 'pure intuition'* ») (Carnap 1939, p. 50), en opposant, par ce même biais, aux mathématiques classiques ce qu'on appelle généralement des « mathématiques constructives » (« *constructive mathematics* ») (Hallett 2013). Plus précisément, comme l'expliquent Anne S. Troelstra et Dirk van Dalen (1988), les mathématiques constructives, telles que les envisageaient les intuitionnistes, se résument à trois principes fondamentaux. Premièrement, « les mathématiques ont trait à des constructions mentales [*'mental constructions'*], que l'esprit saisit de manière immédiate [*'immediately'*] ». Deuxièmement, « il est absurde de parler de la vérité ou de la fausseté d'un énoncé mathématique indépendamment de nos connaissances au sujet d'un tel énoncé [*'truth or falsity of a mathematical statement independently of our knowledge concerning the statement'*] », puisqu'un énoncé mathématique est vrai si et seulement s'il existe une démonstration de sa vérité et il est faux si et seulement si l'on peut montrer, de manière concrète, que « l'hypothèse qu'il existe une démonstration de la vérité de cet énoncé aboutit à une contradiction » (« *the assumption that there is a proof for the statement leads to a contradiction* »). Troisièmement, « les mathématiques sont une libre création [*'free creation'*] : il n'est pas question de reconstruire mentalement ou de saisir la vérité au sujet d'objets mathématiques qui existent indépendamment de nous-mêmes [*'the truth about mathematical objects existing independently of us'*] » (Troelstra & van Dalen 1988, p. 4). En d'autres termes, les intuitionnistes estimaient que tout énoncé mathématique devrait être le résultat d'une opération de construction mentale, si bien qu'il ne saurait être considéré comme ayant été démontré aussi longtemps qu'on n'aurait pas été à même d'en fournir une démonstration finie, c'est-à-dire qu'on n'aurait pas été à

même d'en déterminer la valeur de vérité « par une suite finie de mots » (« *by a finite number of words* ») (Brouwer 1912, 1913 ; Largeault 1992, p. 44)¹³⁶.

Il en découle que les réponses que les intuitionnistes apportaient aux questions soulevées par le programme logiciste, tel qu'il s'était concrétisé dans les *Principia Mathematica*, étaient diamétralement opposées à celles qu'avaient proposées les logicistes eux-mêmes. D'un point de vue logico-linguistique, par exemple, ils entendaient limiter le rôle que joue le langage, qu'il s'agisse du « langage usuel » (« *ordinary language* ») ou du « langage symbolique » (« *symbolic language* »), dans la construction d'objets et d'énoncés mathématiques à celui de simple « auxiliaire non-mathématique [*'non-mathematical auxiliary'*] pour soulager la mémoire mathématique ou permettre à des individus distincts de construire le même ensemble » (Brouwer 1912, 1913 ; Largeault 1992, p. 44), si bien que, comme le remarque W. P. van Stigt (1998), « le principal souci de Brouwer concernait la nature des mathématiques comme pure construction de pensée, dépourvue de tout élément linguistique [*'as pure, 'languageless' thought-construction'*] » (van Stigt 1998, p. 2)¹³⁷. D'un point de vue ontologico-épistémologique, pour reprendre encore une fois ce qu'écrivait Brouwer (1912, 1913) lui-même, les intuitionnistes n'admettaient pas l'existence d'autres ensembles d'objets mathématiques que les « ensembles dénombrables [*'only the existence of denumerable sets'*], c'est-à-dire [les] ensembles dont les éléments peuvent être mis en correspondance biunivoque [*'brought into one-to-one correspondence'*] soit avec les éléments d'un nombre ordinal fini [*'the elements of a finite ordinal number'*], soit avec ceux du nombre ordinal infini ω [*'those of the infinite ordinal number ω '*] (Brouwer 1912, 1913 ; Largeault 1992, p. 44). La raison en était qu'ils considéraient de tels ensembles comme étant les seules collections d'objets que l'on pourrait envisager comme libres produits des facultés représentatives de l'esprit humain – sans qu'il soit donc nécessaire

¹³⁶ Par conséquent, c'est précisément dans un tel sens que l'on peut interpréter ce qu'écrit Brouwer (1912, 1913) dans un article qu'il consacre, justement, aux différences entre le formalisme au sens large du terme – c'est-à-dire aussi bien le formalisme « proprement dit » de l'école hilbertienne que le logicisme – et l'intuitionnisme : « Soit le concept 'nombre réel compris entre 0 et 1' [*'the concept 'real number between 0 and 1'*']. Pour le formaliste ce concept équivaut à 'série élémentaire de digits qui viennent après le point marquant la première décimale' [*'elementary series of digits after the decimal point'*]; pour l'intuitionniste il signifie : 'loi de construction d'une série élémentaire de digits venant après le point marquant la première décimale, formée moyennant un nombre fini d'opérations' [*'law for the construction of an elementary series of digits after the decimal point, built up by means of a finite number of operations'*] » (Brouwer 1912, 1913 ; Largeault 1992, p. 49).

¹³⁷ Comme l'écrivait Brouwer (1952) lui-même, d'ailleurs, « le Premier acte de l'intuitionnisme sépare complètement les mathématiques du langage mathématique, en particulier des phénomènes de langage que décrit la logique théorique, et reconnaît que la mathématique intuitionniste est une activité de l'esprit essentiellement sans langage » (Brouwer 1952 ; Largeault 1992, p. 449).

d'avoir recours à des hypothèses « platoniciennes » quant à leur existence réelle afin d'en étudier les propriétés – et, par conséquent, comme faisant l'objet d'une forme d'intuition mathématique, de nature essentiellement temporelle, que l'on pourrait rapprocher, à son tour, de l'intuition, pour ainsi dire, « kantienne » (« *Anschauung* ») en tant que « mode par lequel [une connaissance] se rapporte immédiatement à des objets, et que toute pensée, à titre de moyen, prend pour fin » (« [Art], *wodurch [eine Erkenntnis] auf [Gegenstände] unmittelbar bezieht, und worauf alles Denken als Mittel abzweckt* ») (Kant 1781, 1787, *A 19/B 33* ; 1980, p. 781)¹³⁸. C'est ainsi que, face aux options alternatives que représentaient le logicisme et l'intuitionnisme, le formalisme hilbertien, en tant que programme de reconstruction formelle des fondements du corps des mathématiques classiques, s'inscrivait en faux aussi bien contre l'un que contre l'autre, tout en essayant d'effectuer une sorte de synthèse entre les deux. Mais en quoi a donc consisté une telle synthèse ?

D'une part, les formalistes de l'école hilbertienne s'opposaient, en effet, aux intuitionnistes en ceci qu'ils proposaient, tout comme les logicistes, de reconstruire le corps des mathématiques classiques sous la forme d'un système axiomatique de formules qui fassent abstraction du contenu, justement, proprement mathématique des énoncés qu'elles formalisent, en utilisant à cet effet un langage formel qui comportent aussi bien des signes mathématiques, tels que les signes des quatre opérations arithmétiques ou les prédicats « $Z(x)$ » (« être un nombre (naturel) ») et « $N(x)$ » (« être un nombre de la seconde classe (des nombres transfinis de Cantor (1883)) »), que des signes logiques, tels que « \rightarrow » (« implique »), « $\&$ » (« et »), « \vee » (« ou »), « \neg » (« non »), « (x) » (« tous ») et « (Ex) » (« il y a ») (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 147), ainsi qu'en se servant de règles d'inférence logiques telles que le principe du tiers exclu (« $\neg(x) A(x) \rightarrow (\exists x) \neg A(x)$ ») (Hilbert 1928 ; Largeault 1992,

¹³⁸ Comme l'expliquait, encore une fois, Brouwer (1952), la mathématique intuitionniste, en tant qu'activité de l'esprit, « prend son origine dans la perception d'un coup de temps, *i.e.* de la division d'un instant de vie en deux objets distincts, dont l'un donne naissance à l'autre tout en étant conservé par le souvenir. Si l'on dépouille de toute qualité la bi-unité ainsi engendrée, reste la forme vide du substrat commun à toutes les bi-unités. Ce substrat commun, cette forme vide, est l'intuition fondamentale des mathématiques » (Brouwer 1952 ; Largeault 1992, p. 449). La conception de la nature des mathématiques et de leurs objets que présente ici Brouwer (1952) fait, ainsi, clairement écho à la définition du concept de « nombre » (« *Zahl* ») que donne Kant (1781, 1787) dans la *Critique de la raison pure* : « Mais le schème pur de la grandeur [*Das reine Schema der Größe*] (*quantitatis*), considérée comme un concept de l'entendement, est le nombre, qui est une représentation embrassant l'addition successive de l'unité à l'unité (de l'homogène) [*eine Vorstellung ist, die die sukzessive Addition von Einem zu Einem (Gleichartigen) zusammenfaßt*]. Le nombre n'est donc autre chose que l'unité de la synthèse du divers d'une intuition homogène en général, du fait que je produis le temps lui-même dans l'appréhension de l'intuition [*nichts anders, als die Einheit der Synthesis des Mannigfaltigen einer gleichartigen Anschauung überhaupt, dadurch, daß ich die Zeit selbst in der Apprehension der Anschauung erzeuge*] » (Kant 1781, 1787, *A 142-143/B 182* ; 1980, p. 888).

p. 148). D'autre part, ils rejetaient, néanmoins, les thèses syntaxiques et sémantiques que les logicistes avaient formulées précisément dans le but de mener à bien une telle axiomatisation des fondements du savoir mathématique. En effet, d'un point de vue sémantique, le programme formaliste a essentiellement consisté, comme le rappelait Carnap (1939) lui-même, à reconstruire les différentes branches des mathématiques sous la forme d'un calcul qui soit dépourvu de toute interprétation, c'est-à-dire qui ne puisse pas même être interprété en termes purement logiques, comme le prétendaient, au contraire, les logicistes, et qui consiste, par conséquent, dans un « stock de formules » (« *ein Bestand an Formeln* ») (Hilbert 1931)¹³⁹. Hilbert (1928) parlait, à ce propos, d'« extension à la mathématique tout entière du point de vue formel de l'algèbre » (« *Ausdehnung des formalen Standpunktes der Algebra auf die gesamte Mathematik* ») (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 152), c'est-à-dire du point de vue qui permet de considérer une formule telle que « $1 + a = a + 1$ », « où

¹³⁹ L'on aurait cependant tort, comme l'observent Paolo Mancosu (1998) et Michael Detlefsen (1993a), de réduire le programme formaliste de l'école de Hilbert à la thèse que « les mathématiques ne sont rien d'autre qu'un 'jeu' que l'on joue avec des symboles » (« *mathematics is a 'game' played with symbols* ») (Detlefsen 1993a, p. 299). En effet, du moins à l'origine, le mot « formalisme » n'a été associé au programme hilbertien ni par Hilbert lui-même, ni par quelques-uns de ses collaborateurs – tels que, par exemple, Paul Bernays, Wilhelm Ackermann ou Jon von Neumann – mais par l'un de leurs adversaires théoriques, c'est-à-dire L. E. J. Brouwer (1912, 1928) lui-même. Ce dernier a toujours employé un tel mot dans un sens très large, c'est-à-dire pour désigner la thèse, très générale, d'après laquelle le raisonnement mathématique consisterait, justement, dans la construction d'un « stock » de formules au moyen de règles abstraites, par opposition à une conception, « intuitionniste », de ce dernier comme étant une expérience introspective qui reviendrait, comme nous l'avons vu plus haut, à construire des objets mathématiques concrets dans la conscience d'un sujet individuel (Detlefsen 1990 ; Mancosu 1998 ; van Stigt 1998). Plus précisément, Detlefsen (1993a, 1993b) distingue deux versions du formalisme de l'école hilbertienne. La première, datant d'avant l'année 1905, se résumerait à « l'idée que la géométrie axiomatique et, à vrai dire, les théories axiomatiques en général ne doivent pas être considérées comme des sciences ayant un objet particulier, mais plutôt comme étant des 'sciences abstraites' – c'est-à-dire, des sciences qui s'appliquent, en quelque sens, à une grande variété d'objets différents » (« *the idea that axiomatic geometry, and, indeed, axiomatic theories generally, are not to be regarded as sciences of a particular subject-matter, but rather as 'abstract sciences' – sciences, that is, which in some sense apply to a variety of different subject-matters* ») – ou, plus précisément, au présupposé « que les théories mathématiques définissent des objets abstraits appelés 'structures relationnelles', et que ces mêmes structures, qui sont les objets propres de l'investigation mathématique, constituent les 'formes' qui sont communes aux différents objets mathématiques particuliers » (« *that mathematical theories define abstract objects called 'relational structures', and that these structures, which are the proper objects of mathematical investigation, constitute 'forms' which different particular subject-matters have in common* ») (Detlefsen 1993a, p. 286). La seconde, datant des années 1920, consisterait, en revanche, dans une radicalisation de la conception des mathématiques axiomatisées comme sciences abstraites dont nous venons de parler. D'après cette autre conception de l'axiomatisation et de la formalisation, toute opération logique et mathématique doit, en effet, être considérée comme étant de nature purement syntaxique, c'est-à-dire comme consistant dans la manipulation de signes et de chaînes de signes, indépendamment de la signification de ces derniers (Detlefsen 1993a, p. 298-299).

a est une véritable variable arithmétique [*‘eine eigentliche Zahlenvariable’*] », non pas uniquement comme « la communication d’un contenu » [*‘die Mitteilung von etwas Inhaltlichem,’*], mais comme étant également

un objet formel [*‘ein gewisses formales Gebilde’*], une formule démontrable [*‘eine beweisbare Formel’*] qui n’a, prise en elle-même, aucune dénotation, et dont la démonstration ne peut pas s’effectuer contentuellement [*‘die an sich nichts bedeutet und deren Beweis nicht inhaltlich geführt werden kann’*], mais requiert l’axiome de réduction. Les formules $1 + 3 = 3 + 1$, $1 + 7 = 7 + 1$, qui sont également susceptibles d’être vérifiées moyennant un raisonnement contentuel [*‘auch durch inhaltliche Überlegung’*] [c’est-à-dire en effectuant l’opération arithmétique dénotée par ‘+’ d’un côté et de l’autre du signe d’égalité ‘=’], ne peuvent s’obtenir de la formule algébrique ci-dessus que par un processus démonstratif [*‘durch ein Beweisverfahren’*], en substituant formellement à a les chiffres 3 et 7, *i.e.* en appliquant une règle de substitution [*‘eine Einsetzungsregel anwenden’*] (Hilbert 1928, p. 152).

Les formules du système axiomatique des mathématiques, telles que les envisageait Hilbert (1928), étaient donc non pas des formules logiques, à proprement parler, mais des « propositions [mathématiques] idéales » (« *ideale Aussagen* »), c’est-à-dire « des formules qui, comme les chiffres de l’arithmétique contentuelle, n’ont, prises en elles-mêmes, aucune dénotation, et ne sont que des objets auxquels nous appliquons nos règles » (« *Formeln, die an sich nichts bedeuten, ebenso wie die Zahlzeichen der inhaltlichen Zahlentheorie, sondern nur Objekte für die Anwendung unserer Regeln sind* ») (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 152). Il en découlait que, afin d’introduire une nouvelle formule qu’il n’était pas possible de dériver de celles qui étaient déjà présentes dans le système, il n’était pas nécessaire de la réduire à un concept ou à un principe logique fondamental, mais il suffisait de l’introduire par l’intermédiaire d’un nouvel axiome¹⁴⁰. C’est pour une telle raison que, d’un point de vue syntaxique, les formalistes considéraient qu’il était nécessaire de s’assurer de la consistance,

¹⁴⁰ Comme l’observe Paolo Mancosu (1998), c’est précisément parce qu’il s’agissait de formules dont l’introduction impliquait une extension du système axiomatique déjà existant, lorsqu’il n’était pas possible de les déduire formellement au sein de ce même système, que Hilbert (1928) les qualifiait d’« éléments idéaux » (« *ideale Elemente* ») : « les mathématiciens parlent d’existence mathématique, et Hilbert [(1919)] observe que l’existence, au sens mathématique du terme, est toujours relative à un certain système [*‘existence in the mathematical sense is always relative to a given system’*]. Lorsqu’on étend le système en y introduisant de nouveaux éléments, c’est alors que nous pouvons parler d’éléments idéaux [*‘ideal elements’*], par rapport au système originaire [*‘with respect to the original system’*] » (Mancosu 1998, p. 159).

de l'indépendance, ainsi que de la portée effective des axiomes du système des mathématiques chaque fois que ce dernier était étendu. Au vu de la nature même des formules dont se composait ce même système, une preuve de consistance nécessitait, néanmoins, l'usage de règles formelles qui ne se limitaient pas aux seules règles de formation et de transformation de la logique symbolique, dans sa forme frégréenne et russellienne, si bien que les formalistes estimaient également qu'il était nécessaire de construire une véritable métathéorie de la mathématique, sous la forme d'une « théorie de la démonstration » (« *Beweistheorie* ») (Hilbert 1918, 1922, 1923, 1926, 1927, 1928, 1931).

Une telle métathéorie de la mathématique devait comporter, par conséquent, des règles et des méthodes de raisonnement qui étaient elles-mêmes mathématiques, telles que, justement, l'induction finie, ou mathématique, – par opposition à l'induction transfinitie – et la récursion primitive¹⁴¹ (Parsons

¹⁴¹ Le principe d'induction transfinitie n'est, en effet, rien d'autre que l'extension du principe d'induction finie à tous les ensembles bien ordonnés – c'est-à-dire à tous les ensembles sur lesquels il est possible de définir une « relation d'ordre linéaire » (« *linear ordering* »), $<$, entre les éléments dont ils se composent [par définition, une relation binaire quelconque, $<$, entre les éléments d'un ensemble P constitue une relation d'ordre linéaire si et seulement si elle remplit les trois conditions suivantes :

- (i) $p \not< p$ pour tout $p \in P$,
- (ii) si $p < q$ et $q < r$, alors $p < r$,
- (iii) $p < q$ ou $p = q$ ou $p > q$ pour tout $p, q \in P$

(Jech 2006, p. 16)], de telle sorte que chacun de leurs sous-ensembles non vides possède un plus petit élément par rapport à la relation d'ordre en question – et notamment à l'ensemble des nombres ordinaux. Considérons, donc, une classe de nombres ordinaux (« *a class of ordinals* ») C et supposons que

- (i) $0 = \emptyset \in C$,
- (ii) si $\alpha \in C$, alors $\alpha + 1 \in C$,
- (iii) si α et β sont des nombres ordinaux, $\alpha = \sup\{\beta: \beta < \alpha\} \neq 0$ et $\beta \in C$ pour tout $\beta < \alpha$, alors $\alpha \in C$.

Nous pouvons en conclure que

C est la classe de tous les nombres ordinaux.

Tel est donc le principe d'induction transfinitie (« *transfinite induction* »), tel que le présente Thomas Jech (2006, p. 21). Quant à la « règle de récursion primitive » (« *rule of primitive recursion* »), comme l'explique Charles Parsons (2007), il s'agit d'une règle qui permet d'introduire de nouveaux foncteurs (« *functors* »), c'est-à-dire de nouveaux morphismes (au sens d'applications entre deux structures mathématiques, du même type, qui en préserve la structure) d'une nature particulière, dans un système formel plus faible que celui de l'arithmétique du premier ordre (« *first-order arithmetic* »), que l'on appelle, justement, « arithmétique récursive primitive » (« *primitive recursive arithmetic* ») (Parsons 2007, p.

1998, 2007 ; Hacking 2014 ; Zach 2019), mais qu'il était nécessaire de ne pas appliquer aux éléments de totalités transfinites, c'est-à-dire aux éléments d'ensembles plus que dénombrables, comme, par exemple, la seconde classe de nombres de Cantor (1883). Faire cela aurait impliqué, en effet, la nécessité de postuler l'existence actuelle – c'est-à-dire en tant qu'objets –, et non pas seulement potentielle – c'est-à-dire en tant que produits d'opérations itératives – d'ensembles infinis, tels que, justement, l'ensemble des nombres naturels, ainsi que la nécessité d'user de procédures de démonstration infinies – c'est-à-dire qui n'aboutissent pas nécessairement à une contradiction ou à une tautologie au bout d'un nombre fini d'étapes – (Mancosu 1998, 2010 ; Hacking 2014 ; Zach 2019), alors que le but de la métathéorie qu'entendait esquisser Hilbert (1923) était précisément de « manier librement et [de] dominer entièrement le transfini » (« *die freie Handhabung und volle Beherrschung des Transfiniten* »), tout « en restant sur le terrain finitiste » (« *auf dem Boden des Finiten* ») (Hilbert 1923 ; Largeault 1992, p. 136), afin de ne pas tomber dans des contradictions telles que, justement, les paradoxes cantoriciens. Ces règles et ces méthodes devaient relever, en conséquence, de ce que Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1927, 1928, 1931) lui-même appelait la mathématique « contentuelle » (« *inhaltlich* »), ce qui veut dire, tout simplement, qu'elles devaient présupposer l'existence d'objets qui étaient dotés de véritables propriétés mathématiques, tout en étant finis. C'est ainsi que Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) distinguait deux branches des mathématiques reconstruites selon une approche formaliste : d'une part, une branche purement formelle, c'est-à-dire une branche qui consistait, justement, dans un calcul logique axiomatique et

237). Il s'agit, plus précisément, d'un système sans quantificateurs logiques dont les formules sont des équations que l'on peut obtenir en appliquant « les opérateurs usuels de la logique propositionnelle » (« *the usual operators of propositional logic* ») (Parsons 2007, p. 237) à un certain nombre de termes particuliers. Les termes en question sont des symboles de variables (« a_1 », « a_2 », ..., « b », etc.), le symbole « 0 » (c'est-à-dire le symbole qui désigne l'élément initial de la série des nombres naturels), le symbole de la fonction « successeur », « S », (si bien que, étant donné le nombre naturel b , Sb n'est rien d'autre que le nombre naturel successif) ou les symboles de foncteurs que l'on peut introduire de la manière suivante, en utilisant, justement, la règle de récursion primitive : on introduit, par récursion primitive, un certain foncteur « φ », à $n + 1$ places, à partir des foncteurs « ψ » et « χ », respectivement à n et à $n + 2$ places, par l'intermédiaire des équations

$$\begin{aligned}\varphi(0, a_1, \dots, a_n) &= \psi(a_1, \dots, a_n) \\ \varphi(Sb, a_1, \dots, a_n) &= \chi[b, \varphi(b, a_1, \dots, a_n), a_1, \dots, a_n].\end{aligned}$$

Autrement dit, la première valeur du nouveau foncteur « φ » est définie au moyen du foncteur d'initialisation « ψ », alors que ses valeurs successives sont définies, de manière récursive et itérative, au moyen du foncteur d'itération « χ » (Parsons 2007, p. 237).

non interprété¹⁴². D'autre part, une branche qui consistait, en revanche, dans un système de règles et de méthodes mathématiques de nature contentuelle, mais « finitiste » (« *finit* », « *finitistisch* ») (Hilbert 1923 ; Carnap 1934 ; Bernays 1938), qui tenaient lieu de règles syntaxiques du « langage-système des mathématiques » (« *language system of mathematics* ») (Carnap 1939, p. 49), et qu'il fallait appliquer, dans le but d'en assurer la cohérence, ou consistance, logique, aux axiomes, aux théorèmes et aux démonstrations – conçues comme étant des concaténations de formules selon des schémas déductifs entièrement formalisés¹⁴³ – qui relevaient de l'autre branche, dont elle constituait, en conséquence, une métathéorie syntaxique. Autrement dit, la différence entre ces deux volets du corps des connaissances mathématiques, entièrement reconstruit en accord avec le programme formaliste, tenait à ceci que le premier était censé exprimer la totalité des contenus dont se composait ce même corps de connaissances – y compris les ensembles et les principes transfinis, ainsi que les contenus qu'on aurait pu y ajouter en y introduisant de nouveaux axiomes – sous la forme d'un système axiomatique de formules non interprétées, alors que le second se résumait, justement, à l'application de règles syntaxiques finitistes, elles-mêmes mathématiques, à un tel système de formules, afin d'en démontrer la cohérence, au moyen d'inférences contentuelles, au fur et à mesure

¹⁴² « L'idée maîtresse de ma théorie [*Der Grundgedanke meiner Beweistheorie*] est la suivante : tout ce qui constitue les mathématiques au sens traditionnel [*im bisherigen Sinne*] est rigoureusement formalisé [*streng formalisiert*], en sorte que la mathématique proprement dite [*die eigentliche Mathematik*] ou au sens strict [*in engerem Sinne*] devient un stock de formules [*zu einem Bestande an Formeln wird*]. Celles-ci se distinguent des formules qu'on a l'habitude d'utiliser en mathématiques seulement par le fait qu'en dehors des signes usuels [*außer den gewöhnlichen Zeichen*], y apparaissent en plus les signes logiques, en particulier ceux pour 'implique' [*folgt*] (\rightarrow) et 'ne ... pas' [*nicht*] (\neg) » (Hilbert 1931 ; Largeault 1992, p. 191-192).

¹⁴³ « Certaines formules qui jouent le rôle de pierres angulaires de l'édifice formel des mathématiques [*Bausteine des formalen Gebäudes der Mathematik*] seront nommées axiomes [*Axiome*]. Une démonstration est un dessin qui se présente à nous comme tel dans l'intuition [*Ein Beweis ist eine Figur, die uns als solche anschaulich vorliegen muß*] et consiste en des inférences conformes au schéma d'inférences [*Schlußschema*] :

$$\frac{S \quad S \rightarrow T}{T}$$

où chaque fois chacune des prémisses, *i.e.* des formules S et $S \rightarrow T$, ou bien est un axiome, ou bien résulte directement d'une substitution dans un axiome [*durch Einsetzung aus einem Axiom entsteht*], ou bien est une formule finale d'une inférence [*mit der Endformel eines Schlusses übereinstimmt*], ou bien coïncide avec une formule qui figure plus haut dans la démonstration, ou bien est issue d'une telle formule par substitution. Une formule sera dite démontrable [*beweisbar*] si elle est soit un axiome soit une formule finale d'une démonstration » (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 147).

que de nouveaux axiomes y étaient introduits, si bien que Hilbert (1923, 1931) la qualifiait de « métamathématique » (« *Metamathematik* »)¹⁴⁴ (Mancosu 1998, 2010). Cette métamathématique ne se réduisait, par conséquent, pas à un ensemble de règles purement logico-syntaxiques, en ceci que la nature contentuelle des règles et des méthodes qui en relevaient présupposait une conception des formules et des démonstrations dont se constituait le système axiomatique de la « mathématique au sens strict » (« *Mathematik in engerem Sinne* ») comme étant – afin qu’on pût leur appliquer ces mêmes règles d’inférence contentuelles, mais comportant un nombre fini d’opérations – des signes primitifs de nature « extra-logique » (« *außer-logisch* »), c’est-à-dire proprement mathématique, qui ressemblaient aux chiffres (« *Zeichen* ») (Hilbert 1923, 1931). Il s’ensuit que, afin d’assurer la consistance du système axiomatique non interprété auquel Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) réduisait les mathématiques formalisées, les règles et les méthodes métamathématiques finissaient par fournir une interprétation sémantique indirecte à ce même système, en interprétant, notamment, les formules qui le constituaient comme étant des propositions mathématiques idéales, sur le modèle des formules algébriques, dont les valeurs de vérité dépendaient de certaines propriétés du système en tant que tel, comme, par exemple, la consistance et la démontrabilité. Autrement dit, comme l’affirmait Hilbert (1923) lui-même,

les axiomes et les propositions démontrables [*die Axiome und beweisbaren Sätze*] [c’est-à-dire les énoncés que l’on peut déduire à partir de ces mêmes axiomes] sont les répliques des pensées [*die Abbilder der Gedanken*] qui constituent depuis toujours la pratique habituelle des mathématiciens [comme le montre, justement, l’exemple de l’algèbre], sans être elles-mêmes les vérités au sens absolu [*sie sind nicht selbst die Wahrheiten im absoluten Sinne*]. Les vérités au sens absolu sont plutôt les vues [c’est-à-dire les démonstrations et les déductions] que fournit ma théorie de la démonstration touchant la démontrabilité et la consistance de ces systèmes de formules [*die Einsichten...hinsichtlich der*

¹⁴⁴ « À la mathématique proprement dite ainsi formalisée [*Zu der eigentlichen so formalisierten Mathematik*] s’ajoute une mathématique d’un genre en quelque sorte nouveau, une métamathématique [*Metamathematik*], nécessaire afin d’assurer l’autre [*zur Sicherung jener notwendig ist*], et dans laquelle – par contraste avec les formes d’inférences purement formelles de la mathématique proprement dite [*die rein formalen Schlußweisen der eigentlichen Mathematik*] – on emploie l’inférence contentuelle [*das inhaltliche Schließen*], mais cela simplement quand il s’agit de prouver la consistance des axiomes [*lediglich zum Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Axiome*] » (Hilbert 1931 ; Largeault 1992, p. 192) sur lesquels repose le système formel auquel se réduit, précisément, ce que Hilbert (1931) appelait « la mathématique proprement dite ».

Beweisbarkeit und Widerspruchsfreiheit jener Formelsysteme] (Hilbert 1923 ; Largeault 1992, p. 133).

Cela signifie que, d'après Hilbert (1923), ce n'étaient pas les formules en tant que composantes individuelles d'un système formalisé qu'il fallait interpréter, mais le système dans sa totalité, en lui attribuant une interprétation contentuelle et finitiste, sous la forme d'une traduction dans le système de l'arithmétique élémentaire, dont la seule justification nécessaire consistait dans le fait qu'elle permettait de démontrer la consistance du système en question, dont elle constituait, en même temps, une application possible¹⁴⁵.

Pour ne donner qu'un exemple de la manière dont se déployait concrètement la démarche hilbertienne, il suffit de prendre en considération sa première – car suivie d'une seconde, tenue en 1927 – communication au sujet de la « nouvelle fondation des mathématiques » (« *Neubegründung der Mathematik* »), dans laquelle Hilbert (1922) commence par présenter une possible reconstruction de l'« arithmétique élémentaire » (« *der elementaren Zahlenlehre* ») « sur la base intuitive des signes concrets » (« *auf dieser rein anschaulichen Basis der konkreten Zeichen* ») (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 117). Pour ce faire, il définit les entiers naturels par construction, comme étant des formules (« *Formeln* ») d'un type particulier – c'est-à-dire des combinaisons, de complexité croissante, des signes élémentaires 1 et +¹⁴⁶ – avant d'introduire d'autres signes, qui servent à dénoter ces mêmes formules dans le but de faciliter la communication, c'est-à-dire les chiffres usuels, tels que 2, 3, etc. Une telle définition permet donc à Hilbert (1922) de donner une interprétation de relations mathématiques telles que l'égalité (« = ») ou la différence (« > ») en leur attribuant un contenu concret – c'est-à-dire en les considérant comme des signes dont la fonction est de communiquer des

¹⁴⁵ Comme l'observait, encore une fois, Carnap (1939), « si l'on peut fournir une preuve de consistance [*a proof of consistency*] pour un calcul donné, alors une interprétation et une application vraies [*a true interpretation and application*] de ce même calcul sont logiquement possibles [*logically possible*] » (Carnap 1939, p. 49). Dans le cadre de la théorie des modèles, pour ainsi dire, « moderne », cette remarque se traduit par le théorème qui affirme qu'un ensemble Γ d'énoncés qui sont formulés dans un certain langage prédicatif est « syntaxiquement consistant » (« *syntactically consistent* ») si et seulement s'il est également « sémantiquement consistant » (« *semantically consistent* »), c'est-à-dire si et seulement s'il existe, dans le langage en question, une « structure » (« *structure* ») sémantique \mathcal{A} qui rend vrais tous les énoncés de Γ , c'est-à-dire qui constitue un « modèle » (« *model* ») pour les énoncés de Γ (Halbach 2010).

¹⁴⁶ Plus précisément, la définition de Hilbert (1922) consiste en deux énoncés fondamentaux : 1) « Le signe [*Das Zeichen*] 1 est un nombre [*eine Zahl*] » ; 2) « Un signe qui commence par 1 et finit par 1, de sorte que, dans l'intervalle [*dazwischen*], + suit toujours 1 et que 1 suit toujours +, est également un nombre. P. ex. les signes 1 + 1, 1 + 1 + 1, sont des nombres » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 117).

assertions au sujet de telle ou telle formule¹⁴⁷ – et, à partir de là, de démontrer quelques propriétés de l’addition de nombres entiers naturels, comme la propriété commutative, par la simple manipulation de formules dont la signification est immédiate et au moyen des contenus que communiquent ces mêmes signes de relation¹⁴⁸. Il remarque, néanmoins, que, même si cette manière intuitive et « contentuelle » (« *inhaltlich* »), c’est-à-dire non formelle et non axiomatique, de concevoir l’arithmétique élémentaire « ne comporte pas...de possibilité de contradiction [*sind auch keinerlei Widersprüche möglich*] » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 118), elle s’avère insuffisante lorsque « nous abordons le point de vue de l’arithmétique et de l’algèbre plus avancées, p. ex. quand nous voulons obtenir des assertions sur une infinité de nombres ou de fonctions » (« *schon beim Übertritt zum Standpunkt der höheren Arithmetik und Algebra, z. B. wenn wir Behauptungen über unendlich viele Zahlen oder Funktionen gewinnen wollen* »), voire celui des fondements de l’analyse (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 119). Comment prolonger donc une telle approche sans avoir recours à des contenus sémantiques abstraits et généraux ? La réponse que Hilbert (1922) apporte à ce problème, toujours dans sa communication de 1922, consiste, précisément, à transposer l’approche intuitive et contentuelle « sur un plan supérieur » (« *auf eine höhere Stufe der Betrachtung* ») en procédant, ainsi, par deux étapes. Premièrement, il s’agit de reformuler « les raisonnements contentuels qu’on fait couramment dans les théories mathématiques » (« *die üblichen inhaltlichen Überlegungen der mathematischen Theorie* »), en remplaçant tous les concepts et tous les énoncés mathématiques par des formules et par des règles de manipulation bien définies. En d’autres termes,

il faut effectuer une formalisation rigoureuse des théories mathématiques tout entières [*‘eine strenge Formalisierung der ganzen mathematischen Theorien’*], avec leurs démonstrations comprises, de façon que les inférences et les conceptualisations mathématiques soient, sur le patron du calcul logique [*‘nach dem Muster des*

¹⁴⁷ « Ainsi $2 + 3 = 3 + 2$ n’est pas une formule, mais sert à communiquer le fait que $2 + 3$ et $3 + 2$ sont le même chiffre [*‘nur zur Mitteilung der Tatsache dienen, daß $2 + 3$ und $3 + 2$...dasselbe Zahlzeichen ...sind’*], à savoir le chiffre $1 + 1 + 1 + 1 + 1$, compte tenu des abréviations en vigueur [*‘mit Rücksicht auf die benutzten Abkürzungen’*] » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 118).

¹⁴⁸ « De notre point de vue actuel [*‘vom gegenwärtigen Standpunkte’*], $\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$ n’est que la communication du fait [*‘die Mitteilung der Tatsache’*] que le chiffre $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ est le même chiffre que $\mathbf{b} + \mathbf{a}$. En même temps on peut s’assurer de l’exactitude du contenu sémantique de cette dernière communication [*‘Und dabei kann dann das inhaltliche Zutreffen dieser Mitteilung folgendermaßen eingesehen werden’*]. En effet nous avons le droit de supposer par exemple que $\mathbf{b} > \mathbf{a}$, *i.e.* que le chiffre \mathbf{b} dépasse le chiffre \mathbf{a} ; alors \mathbf{b} se décompose en $\mathbf{a} + \mathbf{c}$, où \mathbf{c} servira à communiquer un chiffre ; reste donc à démontrer que $\mathbf{a} + \mathbf{a} + \mathbf{c} = \mathbf{a} + \mathbf{c} + \mathbf{a}$, *i.e.* que $\mathbf{a} + \mathbf{a} + \mathbf{c}$ est le même chiffre que $\mathbf{a} + \mathbf{c} + \mathbf{a}$. Mais il en est ainsi dès que $\mathbf{a} + \mathbf{c}$ est le même signe que $\mathbf{c} + \mathbf{a}$, *i.e.* dès que $\mathbf{a} + \mathbf{c} = \mathbf{c} + \mathbf{a}$ » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 118).

Logikkalkuls'], incluses dans l'édifice des mathématiques au titre de parties constituantes formelles [*als formale Bestandteile'*] (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 119)

Il s'agit donc de choisir un certain formalisme et un certain ensemble d'axiomes, dont il sera nécessaire de prouver la consistance en démontrant qu'il est impossible d'en déduire des énoncés contradictoires. Mais comment effectuer une telle démonstration ? C'est précisément dans le but de résoudre ce problème qu'il s'agit, deuxièmement, d'appliquer aux « constituantes formelles » de telle ou telle théorie mathématique que l'on aura préalablement axiomatisée – qu'il s'agisse de l'algèbre, de l'analyse, de la théorie des ensembles, etc. – la même approche intuitive et contentuelle dont Hilbert (1922) s'est précédemment servi, dans ce même article, pour reconstruire les fondements de l'arithmétique élémentaire. Cela signifie que ce sont précisément les « axiomes, formules et démonstrations » (« *Axiome, Formeln und Beweise* ») de la théorie en question « qui deviennent maintenant, tels les chiffres en arithmétique, le thème de raisonnements contentuels, *i.e.* de la pensée véritable [*das eigentliche Denken'*] » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 119). C'est ainsi que Hilbert (1922) définit, par analogie avec les signes qu'il vient d'utiliser dans sa reconstruction contentuelle de l'arithmétique élémentaire, des signes d'espèces distinctes, dont la fonction est de dénoter les différents éléments dont se compose un formalisme donné, afin de pouvoir les soumettre au même mode de raisonnement contentuel¹⁴⁹. Cela lui permet d'atteindre deux objectifs : premièrement,

¹⁴⁹ 1) des « *signes de constantes* » (« *Individualzeichen* »), tels que « 1 » et « + » (qui dénotent toujours des « parties constituantes des chiffres » [*Bestandteile der Zahlzeichen'*]), « $\varphi(*)$ », « $\psi(*)$ », « $\sigma(*,*)$ », « $\delta(*,*)$ » et « $\mu(*,*)$ » (qui dénotent des « constantes de fonctions avec places vides » [*individuelle Funktionen mit Leerstellen'*], voire « des constantes de fonctions de fonctions » [*individuelle Funktionenfunktionen'*]), des signes mathématiques tels que « = » (égal), « \neq » (non-égal) et « > » (plus grand que), « Z » (qui dénote le prédicat « être un nombre entier »), « Φ » (qui dénote le prédicat « être une fonction »), le signe d'implication formelle « \rightarrow », ainsi que le quantificateur universel « () » ; 2) des « *variables* » (« *Variable* »), telles que « a », « b », « c », « d », « p », « q », « r », « s » et « t » (qui dénotent des « variables de base » [*Grundvariable'*]), et donc des variables individuelles, « $f(*)$ » et « $g(*)$ » (qui dénotent des « variables de fonctions » [*variable Funktionen'*], voire des « variables de fonctions de fonctions » [*variable Funktionenfunktionen'*]), ainsi que les signes « A », « B », « C », « D », « S », « T », « U », « V » et « W » (qui dénotent des « variables de formules » [*variable Formeln'*]) ; des « *signes de communication* » (« *Zeichen zur Mitteilung* ») – c'est-à-dire des variables syntaxiques qui tiennent lieu de « *signes abrégiateurs* » (« *Kurzzeichen* ») et dont la seule fonction est ainsi de dénoter un autre signe déterminé pour en abrégier l'écriture – tels que « a », « b », « c » et « k » (qui dénotent des « fonctionnelles » (« *Funktionale* »), à savoir un « chiffre, une variable de base, une constante ou une variable de fonction dont les places vides sont remplacées [*ausgefüllt sind,*] par des chiffres, des variables de base, ou des fonctions, de même qu'une constante ou une variable de fonction de fonction dont les places vides sont remplies »), ainsi que « A », « B », « C », « K », « S » et « T » (qui dénotent des formules) (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 120-121). Ensuite, il définit le concept de « *formule première* » (« *Primformel* ») comme étant le type particulier de

d'introduire « une séparation stricte et systématique [*‘strenge und systematische Trennung’*] entre les formules et les démonstrations formelles d'une part, et les raisonnements contentuels de l'autre » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 119) ; deuxièmement, de se servir d'une approche intuitive et contentuelle pour éclairer deux notions fondamentales, à savoir celle de « démontrabilité » (« *Beweisbarkeit* »)¹⁵⁰, qui permet de déterminer quels sont les théorèmes que l'on peut déduire des axiomes d'une théorie donnée, et celle de « consistance » (« *Widerspruchsfreiheit* »)¹⁵¹, qui devient ainsi, dans le cadre de la démarche hilbertienne, le critère ultime dont on peut se servir pour éliminer les systèmes d'axiomes qui se révèlent être logiquement inadéquats.

Par conséquent, c'est précisément dans la mesure où elle reposait sur une généralisation du domaine d'application des mathématiques constructives et contentuelles que la démarche formaliste de Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931) se rapprochait de la conception des méthodes et des objets mathématiques que défendaient les intuitionnistes. De surcroît, d'un point de vue épistémologique, Hilbert (1931) lui-même considérait que les signes dont il faudrait se servir dans le cadre de la théorie de la démonstration feraient l'objet d'une troisième forme de cognition, par-delà l'intuition sensible et la pensée logique, c'est-à-dire d'une forme d'intuition qu'il supposait être, elle

combinaison de signes que l'on obtient en plaçant « une fonctionnelle des deux côtés du signe = ou du signe \neq », ou bien « en remplissant par une fonctionnelle la place vide du signe logique Z » (« $\mathbf{a} = \mathbf{b}$ » est donc une formule). À ce premier type de formule, il faut également ajouter la « formule implicative » (« *Folgeformel* »), que l'on obtient en plaçant « des deux côtés d'un signe d'implication une formule première...une variable de formule », ou bien toute autre formule précédemment constituée (« $\mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}$ » est donc une formule implicative). Dans une telle perspective, les axiomes ne sont donc rien d'autre que les formules qui « servent de pierres d'angle [*‘Bausteine’*] de l'édifice formel » d'une théorie formalisée (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 121). Par exemple, afin de proposer une axiomatisation de l'arithmétique élémentaire, Hilbert (1922) formule les axiomes suivants : 1. $a = a$, 2. $1 + (a + 1) = (1 + a) + 1$, 3. $a = b \rightarrow a + 1 = b + 1$, 4. $a + 1 = b + 1 \rightarrow a = b$, 5. $a = c \rightarrow (b = c \rightarrow a = b)$ (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 122). En conclusion, Hilbert (1922) présente également des règles de transformation et de substitution, qui déterminent quels sont les signes qui peuvent être remplacés au sein d'une formule donnée, ainsi que l'usage des parenthèses et celui du quantificateur universel, et qui s'accompagnent également d'une règle d'inférence fondamentale consistant, justement, dans un « schéma d'inférence » (« *Schlussschema* ») (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 121-122).

¹⁵⁰ Comme nous l'avons remarqué plus haut, d'après Hilbert (1922, 1928), une formule est dite « démontrable » (« *beweisbar* ») « si elle est soit un axiome, soit issue d'un axiome par substitution, soit formule finale d'une démonstration, soit issue d'une telle formule finale par substitution. De ce fait, le concept de 'démontrable' est à interpréter relativement au système d'axiomes pris pour base » (« *wenn sie entweder ein Axiom ist bzw. durch Einsetzen aus einem Axiom entsteht oder die Endformel eines Beweises ist bzw. durch Einsetzung aus einer solchen Endformel entsteht. Somit ist der Begriff 'beweisbar' relativ bezüglich des zugrunde liegenden Axiomensystems zu verstehen.* ») (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 123).

¹⁵¹ « Ensuite, nous dirons qu'un système d'axiomes est *consistant* [*‘widerspruchsfrei’*] s'il ne permet pas de démontrer des formules $\mathbf{a} = \mathbf{b}$ et $\mathbf{a} \neq \mathbf{b}$, où \mathbf{a} et \mathbf{b} sont mis pour des fonctionnelles » (Hilbert 1922 ; Largeault 1992, p. 124).

aussi, de nature proprement mathématique¹⁵² (Mancosu 1998). Néanmoins, contrairement aux intuitionnistes, les formalistes hilbertiens étaient résolument opposés à l'idée qu'il fallait se débarrasser de tous les principes mathématiques et logiques de nature transfinie, comme, justement, le principe du tiers exclu, en ceci qu'ils considéraient qu'on pouvait les réduire à des énoncés finitistes. Hilbert (1928) donne lui-même un exemple d'une telle réduction dans un autre article sur les fondements des mathématiques (*die Grundlagen der Mathematik*), datant de 1928, où il définit le quantificateur universel à l'aide de formules qui contiennent la fonction logique « ε » (« *die logische ε -Funktion* »), c'est-à-dire un opérateur logique tel que « l'expression $\varepsilon(A)$ [où ' A ' est un prédicat quelconque] représente un objet pour lequel la proposition $A(a)$ est vraie à coup sûr pourvu qu'elle soit vraie de quelque objet que ce soit [*'ein Ding, für das die Aussage $A(a)$ sicher zutrifft, wenn sie überhaupt für ein Ding zutrifft'*] » (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 148) : si le prédicat « A » est vrai d'au moins un objet de l'univers du discours en question, quel que soit cet objet, alors il est forcément vrai de l'objet, pour ainsi dire, « représentatif » $\varepsilon(A)$. C'est pourquoi Hilbert (1928) pouvait en conclure qu'affirmer qu'un prédicat « A » est vrai de l'objet représentatif de sa négation « $\neg A$ » – c'est-à-dire d'un objet pour lequel la proposition « $A(a)$ » est fausse à coup sûr pourvu qu'elle soit fausse de quelque objet que ce soit – équivaut, d'un point de vue logique, à affirmer qu'un tel prédicat est vrai de tout objet x , et donc que « $(x) A(x) \Leftrightarrow A(\varepsilon(\neg A))$ » (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 148), ce qui constitue, précisément, un équivalent finitiste – car il porte sur un objet particulier et non pas sur un ensemble infini d'objets – du principe du tiers exclu, d'après lequel un

¹⁵² « Une étude soignée nous conduit à reconnaître l'existence, en plus de l'expérience et de la pensée, d'une troisième source de connaissance [*'eine dritte Erkenntnisquelle'*]. Même si dans le détail nous ne pouvons plus aujourd'hui donner raison à Kant, l'idée maîtresse la plus générale de la théorie kantienne conserve sa portée : définir l'attitude intuitive *a priori* [*'anschauliche Einstellung a priori'*] et par là étudier la condition de la possibilité de toute connaissance [*'die Bedingung der Möglichkeit jeder Erkenntnis'*]. À mon avis, c'est, pour l'essentiel, ce qu'ont réalisé mes travaux sur les principes de la mathématique. L'*a priori* y réside ni plus ni moins que dans une attitude fondamentale que je caractérise volontiers de finitiste [*'finite Einstellung'*] : nous est précisément déjà donné d'avance quelque chose dans la représentation [*'in der Vorstellung'*], certains objets concrets extra-logiques [*'außer-logische konkrete Objekte'*], qui intuitivement sont, à titre d'expérience immédiate [*'anschaulich als unmittelbares Erlebnis'*], présents avant toute pensée [*'vor allem Denken'*]. Pour que l'inférence logique soit sûre, il faut que ces objets soient parfaitement visualisables dans toutes leurs parties [*'vollkommen in allen Teilen überblicken lassen'*], que leur production, leur caractère distinct, leur agencement en une suite ou leur juxtaposition soient donnés, en même temps qu'eux, d'une manière immédiatement intuitive [*'unmittelbar anschaulich'*], comme quelque chose d'irréductible à quoi que ce soit d'autre [*'das sich nicht noch auf etwas anderes reduzieren läßt'*] et ne nécessitant point d'être réduit à son tour. Telle est l'attitude fondamentale [*'die Grundeinstellung'*] que je tiens pour indispensable à la mathématique de même qu'en général à toute pensée, tout acte de compréhension et de communication scientifiques quel qu'il soit, attitude à défaut de laquelle aucune activité intellectuelle n'est possible » (Hilbert 1931 ; Largeault 1992, p. 188-189).

énoncé peut être considéré comme étant universellement vrai jusqu'à ce qu'on ne parvienne à en trouver un contre-exemple. Nous pouvons donc en conclure que la synthèse entre logicisme et intuitionnisme que proposait le programme hilbertien, dans le but d'étendre à toutes les branches des mathématiques l'axiomatisation de la géométrie que Hilbert (1899) avait lui-même achevée à l'aube du XX^e siècle, consistait à reconstruire le corps des mathématiques classiques sous la forme d'un système axiomatique formulé dans un langage logico-symbolique qui comportait également des signes mathématiques, comme le suggéraient les logicistes, tout en maintenant que ce même système ne pouvait pas être interprété en termes purement logiques, en ceci qu'il devait faire l'objet d'une métathéorie, justement, mathématique, mais finitiste, et donc conçue d'une manière qui se rapprochait de celle dont les intuitionnistes envisageaient eux-mêmes la nature du raisonnement mathématique. Plus précisément, la synthèse hilbertienne du logicisme et de l'intuitionnisme s'est concrétisée par l'élaboration d'une vision de l'axiomatisation des mathématiques qui comportait également la formalisation *stricto sensu* de ces dernières, au moyen d'un formalisme logico-mathématique, pour ainsi dire, « universel », et le développement d'une métathéorie des mathématiques, sur le modèle de l'arithmétique élémentaire, qui permette de concevoir les formules des mathématiques formalisées comme étant de simples signes, ou chiffres. En conséquence, c'est précisément dans une telle synthèse que consistait également la réponse, alternative aussi bien à celles des logicistes qu'à celles des formalistes, que l'école hilbertienne a fini par apporter à la question logico-linguistique et à la question ontologico-épistémologique qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica*. Cela dit, en quoi une telle réponse était-elle liée à l'extension du programme hilbertien non seulement à l'ensemble des sciences mathématiques, mais également aux pans les plus mathématisés des sciences de la nature ? Quels sont les problèmes logiques et philosophiques qu'elle a fini par léguer aux membres du Cercle de Vienne et, plus généralement, aux tenants de l'empirisme logique ?

2.2.2 La complétude des systèmes formels et l'extension de la méthode axiomatique aux sciences physiques : les limites du programme formaliste

Comme première chose, nous pouvons remarquer que c'est toujours par rapport à une telle synthèse que nous pouvons situer le programme d'axiomatisation des sciences physiques que Hilbert (1901) avait énoncé lors d'un discours qu'il avait tenu en 1900, au Congrès international de mathématiques de Paris, au cours duquel, parmi les 23 problèmes qu'il considérait comme étant cruciaux pour le développement des mathématiques au cours du siècle qui venait de commencer, il avait, en effet, énuméré également le suivant : « les recherches sur les fondements de la géométrie nous inspirent la tâche de traiter axiomatiquement [*'axiomatisch zu behandeln'*], sur le modèle de ces

dernières, les disciplines physiques dans lesquelles les mathématiques jouent d'ores et déjà un rôle prééminent », à savoir, en premier lieu, le « calcul des probabilités » (« *Wahrscheinlichkeitsrechnung* ») et la « mécanique » (« *Mechanik* ») (Hilbert 1901). Plus précisément, le lien qui existe entre l'extension de la démarche axiomatique aux sciences physiques et le programme formaliste est explicité par Hilbert (1928) lui-même dans l'article sur les fondements des mathématiques, datant de 1928, dont nous avons parlé plus haut. Dans cet article, l'auteur se défend de l'accusation d'avoir fait « dégénérer les mathématiques en un jeu [de formules] » (« *der Vorwurf, daß die Mathematik in ein Spiel ausarte* ») en introduisant, dans son système, la fonction « ε » au moyen d'un axiome existentiel spécifique, de nature logique, c'est-à-dire « $A(a) \rightarrow A(\varepsilon(A))$ », et en en déduisant des principes transfinis sous la forme d'énoncés idéaux auxquels il n'est pas possible d'attribuer aucune interprétation mathématique concrète, du moins lorsqu'on les considère isolément. Pour ce faire, il affirme que sa méthode est tout à fait équivalente à celle du physicien qui

demande précisément à une théorie de dériver les théorèmes particuliers à partir de lois de la nature ou d'hypothèses [*'aus den Naturgesetzen oder Hypothesen'*], sans recourir aux conditions extérieures [*'ohne Heranziehung anderweitige Bedingungen'*], donc sur la base d'un simple jeu de formules [*'also auf Grund eines reinen Formelspieles'*]. Seules certaines combinaisons ou certaines conséquences des lois physiques sont contrôlables par l'expérience [*'können durch das Experiment kontrolliert werden'*] – exactement comme dans ma théorie de la démonstration seule les propositions réelles sont susceptibles immédiatement d'une vérification [*'nur die realen Aussagen unmittelbar einer Verifikation fähig sind'*] (Hilbert 1928 ; Largeault 1992, p. 158).

En d'autres termes, afin de justifier la nature abstraite et, justement, idéale des formules axiomatiques auxquelles il avait réduit les principes fondamentaux des mathématiques classiques, Hilbert (1928) a fini par développer une théorie de la démonstration qui se fondait, du moins implicitement, sur le présupposé que les axiomes des mathématiques jouent le même rôle que les lois physiques, aussi bien d'un point de vue logique que d'un point de vue épistémologique : tout comme les physiciens construisent des édifices théoriques non pas en généralisant des observations empiriques particulières, mais en formulant des lois hypothétiques qui visent à rendre compte de ces mêmes observations et en en déduisant des conséquences logiques qui sont susceptibles de confirmer empiriquement les lois en question, ainsi que d'en étendre la portée explicative, les mathématiciens élaborent des théories déductives et axiomatiques en introduisant des énoncés idéaux dans des systèmes déjà existants et en testant la consistance logique, l'indépendance et la portée des nouveaux axiomes, mais seulement

après qu'ils les ont traduits en énoncés réels qui relèvent des mathématiques contentuelles et finitistes. Comme l'a observé Paolo Mancosu (2001, 2008), cette analogie entre la structure des théories mathématiques et celle des théories physiques traduit une conception des fondements des mathématiques que l'on pourrait qualifier d'« hypothético-inductiviste » (« *hypothetico-inductivist* ») (Mancosu 2001) – et que l'on retrouverait également chez Russell (1907, 1924) et chez Gödel (1944, 1947)¹⁵³ –, d'après laquelle la métamathématique contentuelle et finitiste constituerait une base inductive permettant, à la fois, de formuler et de contrôler les axiomes des mathématiques formelles, que l'on pourrait, ainsi, considérer comme étant analogues aux lois physiques – conçues comme « généralisations symboliques » (Duhem 1906) de nature purement hypothétique – précisément en ceci qu'ils ne seraient rien d'autre que des énoncés idéaux, et donc dépourvus de toute interprétation directe.

De surcroît, une telle interprétation de l'analogie entre théories mathématiques et théories physiques que dresse Hilbert (1928) dans son article de 1928 est cohérente avec les conclusions que Leo Corry (1997) a tirées de son analyse des cours sur la méthode axiomatique et ses applications à différentes disciplines scientifiques que Hilbert (1905) lui-même avait tenus, en 1905, à l'Université de Göttingen. Plus précisément, la conception des relations entre axiomatisation des disciplines mathématiques – et notamment de la géométrie et de l'arithmétique – et axiomatisation des disciplines physiques – telles que la mécanique, la thermodynamique, le calcul des probabilités, la théorie cinétique des gaz, etc. – que l'on peut extrapoler de ces cours est une conception que l'on pourrait qualifier de « solidaire », en ceci qu'elle permet de considérer la seconde comme étant un complément nécessaire de la première, et inversement. D'une part, bien qu'il estimât que la méthode dont il fallait se servir pour développer et pour appliquer les axiomes du système de la géométrie, ou de l'arithmétique, formalisée était, justement, de nature purement formelle, et donc indépendante de toute interprétation logique ou empirique des concepts mathématiques, Hilbert (1905) maintenait, en même temps, que l'« 'origine' génétique » (« *'genetic' origin* ») de ces mêmes axiomes était, quant à elle, « fermement ancrée dans l'expérience » (« *firmly grounded in experience* ») (Corry 1997, p.

¹⁵³ « D'abord, en 1928, Hilbert suggère que la partie non finitiste des mathématiques peut être reliée aux parties finitistes comme les parties théoriques de la physique sont reliées aux énoncés qui peuvent être vérifiés directement par observation. Mais cela rappelle également les positions de Russell et Gödel sur l'« inductivisme » dans les fondements des mathématiques, où l'analogie est la suivante : de même qu'en physique la partie théorique est introduite pour « expliquer » les observations, de même en mathématique le royaume non finitaire supérieur pourrait jouer un « rôle explicatif » relativement à la partie finitaire » (Mancosu 2008, p. 63).

126-127)¹⁵⁴. Il en découlait que, du moins en première instance, tout système d'axiomes devait rendre compte des intuitions empiriques essentielles que l'on pouvait considérer comme étant au fondement de tel ou tel domaine d'objets mathématiques. D'autre part, Hilbert (1905) considérait également qu'il était indispensable d'introduire dans les sciences physiques la même méthode formelle d'analyse et de développement des axiomes dont il s'était lui-même servi dans ses travaux sur les fondements de la géométrie, afin de pouvoir décomposer chaque concept physique en « un système de notions plus simples et mutuellement indépendantes qui expriment les *intuitions fondamentales* qui les concernent » (« *a system of several, mutually independent, simpler notions that express the basic intuitions involved* ») (Corry 1997, p. 132). Un exemple en est le concept de somme de deux forces en tant que somme de vecteurs tridimensionnels, que Hilbert (1905) décompose, dans ses cours sur l'axiomatisation de la mécanique, à l'instar de la manière dont il avait lui-même décomposé le concept géométrique de ligne droite en formulant des axiomes qui ont trait aux relations entre les points d'un espace donné. De plus, l'un des axiomes dont Hilbert (1905) se sert, justement, pour constituer le système de notions plus élémentaires qui est censé définir le concept physique de somme vectorielle est un équivalent des deux « axiomes de continuité » (« *Stetigkeitsaxiome* ») que l'on retrouve dans *Les Fondements de la géométrie*, et notamment de l'« axiome d'Archimède » (« *archimedisches Axiom* »), puisqu'il affirme ce qui suit :

L'addition [vectorielle] est une opération continue [*'eine stetige Operation'*], c'est-à-dire que, étant donné un domaine suffisamment petit [*'zu einem genügend kleiner Gebiete'*], G , autour du point d'arrivée [*'um den Endpunkt'*] [du vecteur] $A + B$, l'on peut toujours définir [*'abgrenzen'*] des domaines G_1 et G_2 autour des points d'arrivée, respectivement, [du vecteur] A et [du vecteur] B , tels que le point d'arrivée de la somme de tout couple de vecteurs dont les points d'arrivée appartient, respectivement, à G_1 et à G_2 se trouvera au voisinage de G [*'der Endpunkt der Summe jedes im G_1 u. G_2 endigenden Vectorpaares nach G fällt'*] (Hilbert 1905 ; cité par Corry 1997, p. 133 n120).

¹⁵⁴ « C'est ainsi que, dans toute science, l'on retrouve la tâche [*'So ist in jeder Wissenschaft die Aufgabe,'*] d'édifier, avant toute chose, un réseau de concepts, au moyen d'axiomes dont l'élaboration exige que nous nous laissions guider par l'intuition et l'expérience [*'bei dessen Aufstellung wir uns natürlich durch die Anschauung und Erfahrung leiten lassen'*]. Idéalement, tous les phénomènes qui relèvent du domaine en question [*'alle Erscheinungen des betr. Gebietes'*] trouvent leur place dans ce réseau de concepts et chacun des théorèmes que l'on peut déduire de ces axiomes trouve sa confirmation dans ces mêmes phénomènes [*'und daß jeder aus den Axiomen folgende Satz dabei Verwertung findet'*] » (Hilbert 1905 ; cité par Corry 1997, p. 127 n102).

En conséquence, tout comme l'axiome d'Archimède, d'après lequel « si AB et CD sont deux segments quelconques [*irgendwelche Strecken*'], il existe un nombre entier n [*eine Anzahl n*] tel que le report du segment CD répété n fois à partir de A sur la demi-droite déterminée par B [*das n -malige Hintereinander-Abtragen der Strecke CD von A aus auf den durch B gehenden Halbstrahl*'] conduit à un point situé au-delà de B » (Hilbert 1899 ; 1971, p. 40), permet d'affirmer qu'il est possible de décomposer n'importe quel segment d'une certaine droite en un multiple de n'importe quel autre segment, qui se trouve sur la même demi-droite, à condition que l'on soit prêt à accepter une certaine marge d'erreur, l'axiome de continuité que Hilbert (1905) énonce dans son cours sur l'axiomatisation de la mécanique permet d'affirmer que la somme de deux vecteurs, représentant autant de forces physiques, est indépendante de leurs points de départ respectifs, toujours à une certaine marge d'erreur près, en ceci que le point d'arrivée de la somme de deux vecteurs quelconques, dont les points d'arrivée se trouvent, respectivement, au voisinage du point d'arrivée du vecteur A et de celui du vecteur B , se trouvera, justement, au voisinage du point d'arrivée du vecteur $A + B$.

C'est précisément pour une telle raison que les différents axiomes de continuité dont nous venons de parler peuvent être considérés comme autant de principes qui nous permettent d'attribuer une signification au concept de « mesure » de l'intensité de telle ou telle grandeur – qu'il s'agisse d'une grandeur concrètement mesurable (telle l'intensité d'une force mécanique) ou d'une grandeur qui caractérise une entité abstraite (telle la longueur d'un segment géométrique quelconque). De plus, cette généralité des axiomes de continuité est énoncée par Hilbert (1905) lui-même, encore une fois dans ses cours sur la méthode axiomatique, lorsqu'il les reformule de la manière suivante :

Si l'on prescrit d'avance un certain degré de précision, suffisamment petite [*ein gewisser genügend kleiner Genauigkeitsgrad*'], pour que l'on puisse considérer une certaine assertion comme étant satisfaite [*für die Erfüllung der Behauptung*'], l'on peut identifier un domaine [*ein Gebiet*'] au sein duquel l'on peut choisir les présupposés logiques [de l'assertion en question], sans que la déviation [de la réalisation effective de l'assertion par rapport à l'assertion même] dépasse le degré de précision que l'on a prescrit d'avance [*man kann die Voraussetzungen frei wählen, ohne daß die Abweichung der Behauptung den vorgeschriebenen Grad überschreitet*'] (Hilbert 1905 ; cité par Corry 1997, p. 135 n125).

Par conséquent, c'est précisément en raison du rôle qu'ils jouaient dans la justification théorique non seulement de la possibilité d'effectuer des mesures, mais également, de manière plus générale, de celle d'énoncer des propriétés d'objets concrets ou abstraits, toujours à une certaine marge d'erreur

près, que Hilbert (1901, 1905, 1916, 1917) considérait qu'il fallait les placer « au premier rang » (« *on top* ») non seulement dans le système axiomatique de la géométrie, mais également dans celui de « chaque science naturelle » (« *every natural science* »), « puisqu'[ils] nous [permettent] d'affirmer la validité de nos présupposés et de nos assertions » (« *since it allows us to assert the validity of our assumptions and claims* ») (Corry 1997, p. 134), ce qui témoigne, encore une fois, de la vision unitaire de l'axiomatisation des sciences formelles et des sciences physiques que prônait Hilbert (1905). Néanmoins, cela témoigne également du fait que, comme l'observe, encore une fois, Thomas Mormann (2007), Hilbert (1901, 1905, 1916, 1917) estimait que l'axiomatisation des théories physiques constituait une tâche plus complexe que l'axiomatisation des théories mathématiques, mais dont la nature n'était pas essentiellement différente, si bien que son « approche tendait à estomper la différence entre les mathématiques et les sciences empiriques » (« *his approach tended to blur the difference between mathematics and the empirical sciences* ») (Mormann 2007, p. 139). C'est précisément en cela que consiste, par conséquent, la première problématique que le programme hilbertien de reconstruction axiomatique des sciences formelles et naturelles a fini par léguer aux membres du Cercle de Vienne, c'est-à-dire le problème d'envisager un programme universel d'axiomatisation et de formalisation *stricto sensu* des théories scientifiques qui n'aboutisse pas, pour autant, à un effacement des distinctions logiques et épistémologiques qui existent entre les sciences formelles et les sciences empiriques.

Une autre difficulté à laquelle se heurtaient les tentatives de généraliser l'approche hilbertienne de l'axiomatisation, et qui s'ajoutait à cette première problématique, venait des implications du second théorème, dit « d'incomplétude », de Gödel (1931). Ce théorème démontre, en effet, que si un système formel de l'arithmétique est consistant, alors il est impossible de fournir une démonstration métamathématique de ce fait, du moins si l'on se limite à utiliser, au niveau métamathématique, les règles d'inférence qui sont propres à ce même système (Nagel & Newman 1958 ; Smoryński 1977 ; Smullyan 1992 ; van Dalen 1994 ; Smith 2007 ; Raatikainen 2020), et notamment si l'on adopte, justement, la « position (métamathématique) finitiste » (« *finite Einstellung* ») que prônait l'école hilbertienne (Hilbert 1923 ; Bernays 1938). Plus précisément, le second théorème de Gödel (1931) affirme que

soit k une classe récursive consistante quelconque de FORMULES [*eine beliebige rekursive widerspruchsfreie Klasse von Formeln*'], alors la FORMULE PROPOSITIONNELLE [*Satzformel*'] qui affirme que k est consistante [*widerspruchsfrei*'] n'est pas k -DÉMONSTRABLE [*nicht k-beweisbar*']; plus particulièrement, la consistance de P [c'est-à-dire du système que l'on obtient en

superposant le formalisme logique des *Principia Mathematica* à celui de l'arithmétique de Peano (1889)] n'est pas démontrable dans P , à condition que P soit consistant [*'ist die Widerspruchsfreiheit von P in P unbeweisbar, vorausgesetzt daß P widerspruchsfrei ist'*] (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 140),

où, par « classe récursive de formules (propositionnelles) », l'on entend un ensemble d'énoncés qui constituent les valeurs possibles d'une fonction propositionnelle – au sens de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) – à $n \geq 1$ places que l'on peut définir, dans le cadre du système formel que construit Gödel (1931) dans son article, au moyen d'une fonction arithmétique récursive (« *rekursive Zahlentheoretische Funktion* »)¹⁵⁵, et, par « formule k -démontrable », l'on entend une formule que l'on peut déduire, par l'intermédiaire des règles de transformation qui caractérisent ce même système formel, de celles qui constituent la classe k . Ce système formel, P , n'est, à son tour, rien d'autre que le résultat d'une double opération de formalisation de l'arithmétique de Peano (1889), qui s'opère par l'intermédiaire du formalisme – c'est-à-dire du vocabulaire, ainsi que des règles de formation, de substitution et d'inférence – des *Principia Mathematica*, et d'« arithmétisation » (Nagel *et al.* 1989) de ce même formalisme, qui consiste à assigner un nombre naturel à chacun des « constantes logiques » (« *logische Konstante* ») primitives – issues des *Principia Mathematica* – dont se compose le vocabulaire de P (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 108), par le biais d'une relation de correspondance biunivoque, ainsi qu'à attribuer aux signes et aux variables « élémentaires » (« *Grundzeichen* ») de tous les autres types – c'est-à-dire les signes et variables de « type 1 » (« *ersten Typs* »), qui dénotent des « individus » (« *Individuen* ») (et donc des nombres naturels), les signes et variables de « type 2 » (« *zweiten Typs* »), qui dénotent des « classes d'individus » (« *Klassen von Individuen* ») (et donc des classes de nombres naturels) ou des fonctions propositionnelles de premier ordre, les signes et variables de « type 3 » (« *dritten Typs* »), qui dénotent des « classes de classes d'individus » (« *Klassen von Klassen von Individuen* ») (et donc des classes de classes de nombres

¹⁵⁵ « Une fonction arithmétique φ est dite *récursive*, s'il existe une suite finie de fonctions arithmétiques [*'eine endliche Reihe von zahltheoretischen Funktionen'*] $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ qui s'achève par φ et qui possède la propriété que toute fonction φ_k de la suite est définie récursivement [*'rekursiv definiert'*] par les deux fonctions [$\varphi(0, x_2, \dots, x_n) = \psi(x_2, \dots, x_n)$; $\varphi(k + 1, x_2, \dots, x_n) = \mu(k, \varphi(k, x_2, \dots, x_n), x_2, \dots, x_n)$, pour tout x_2, \dots, x_n, k], ou résulte [de l'une de ces deux fonctions] par substitution [*'durch Einsetzung'*] ou, en dernier ressort, est une constante ou la fonction de succession [*'Nachfolgerfunktion'*] $x + 1 \dots$. Une relation $R(x_1, \dots, x_n)$ entre nombres naturels est dite *récursive*, s'il existe une fonction récursive $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ telle que, pour tout x_1, \dots, x_n ,

$$R(x_1, \dots, x_n) \sim [\varphi(x_1, \dots, x_n) = 0] \text{ »}$$

(Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 117).

naturels) ou des fonctions propositionnelles de second ordre, etc. (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 112) – des « nombres de la forme p^n » (« *Zahlen der Form p^n* »), où p est un nombre premier supérieur aux nombres premiers qu'on a attribués aux constantes logiques et n est le nombre du type en question (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 116). Un tel système de codage arithmétique permet, en conséquence, de traduire par correspondance biunivoque, en P , toute formule de la logique des prédicats que l'on peut construire dans le système des *Principia Mathematica* dans un entier naturel ou dans une suite finie d'entiers naturels. Par exemple, si l'on associe le nombre 4 à la constante logique « \exists » (« il existe »), le nombre 5 à la constante logique « = » (« égal »), le nombre 7 à la constante logique « s » (« être le successeur immédiat »), le nombre 8 à la constante logique « (» et le nombre 9 à la constante logique «) », ainsi que les nombres 11 et 13 aux variables de type 1 x et y , il est possible d'assigner à la formule « $(\exists x) (x = sy)$ », que l'on pourrait traduire par l'expression française « tout entier naturel a au moins un successeur direct », la suite finie d'entiers naturels (8, 4, 11, 9, 8, 11, 5, 7, 13, 9) (Nagel *et al.* 1989, p. 73). En se servant de ce même système de codage, il est également possible de « projeter » (« *zuordnen* »), par la suite, toute suite finie de nombres naturels, et donc toute formule logique, sur l'ensemble de ces mêmes nombres, c'est-à-dire de mettre toute formule logique « en correspondance biunivoque » (« *in eineindeutiger Weise* ») avec un nombre premier donné, en vertu du théorème fondamental de l'arithmétique, qui assure, justement, l'unicité de la décomposition en un produit de facteurs premiers de tout entier strictement positif. Pour ce faire, nous pouvons donc associer, par exemple, « le nombre $2^{n_1} \cdot 3^{n_2} \cdot \dots \cdot p_k^{n_k}$, où p_k signifie le k -ième nombre premier (par ordre de grandeur croissante) [*die k-te Primzahl (der Größe nach)*]', à la suite n_1, n_2, \dots, n_k », de telle sorte que, étant donnée une formule du formalisme de P , il est toujours possible d'y assigner un nombre naturel et, étant donné un nombre naturel quelconque, il est toujours possible de déterminer s'il correspond à une formule logique ou non (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 116).

Il s'ensuit que, dans le système formel que définit Gödel (1931) , P , il est possible non seulement de réduire les formules propositionnelles qui expriment les propriétés logico-formelles des nombres naturels, ainsi que les relations (elles aussi de nature logico-formelle) qui existent entre ces derniers, telles qu'elles sont définies dans le cadre de l'arithmétique de Peano (1889), – comme, justement, la formule « $(\exists x) (x = sy)$ » – à des nombres naturels, mais également de transformer les énoncés métamathématiques qui décrivent les propriétés de (et les relations entre) ces mêmes formules – et qui correspondent, dans le langage originaire des *Principia Mathematica*, à des fonctions propositionnelles d'ordre supérieur – en expressions qui décrivent des relations contentuelles entre des nombres naturels concrets – telles que, par exemple, l'énoncé arithmétique « $4 = 3 + 1$ » ou la

fonction arithmétique « $\varphi(a) = a + 1$ », où a est une variable dont le parcours de valeurs est contenu dans l'ensemble des entiers naturels. Pour ce faire, il suffit de désigner par

$\Phi(a)$ le nombre assigné au signe primitif (ou à la suite de signes primitifs) a [*'Die dem Grundzeichen (bzw. der Grundzeichenreihe) a zugeordnete Zahl'*]. Soit maintenant une relation (ou classe) [*'eine Klasse oder Relation'*] $R(a_1, a_2, \dots, a_n)$ entre des signes primitifs ou des suites de signes primitifs. Nous associons à cette relation la relation (ou classe) $R'(x_1, x_2, \dots, x_n)$ entre des nombres naturels [*'zwischen natürlichen Zahlen'*] qui n'existe entre x_1, x_2, \dots, x_n que si, et seulement si, il existe a_1, a_2, \dots, a_n tels que $x_i = \Phi(a_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) et $R(a_1, a_2, \dots, a_n)$ est valide (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 116).

Il en découle que la démarche qu'adopte Gödel (1931) dans son article sur l'incomplétude des *Principia Mathematica* et des systèmes formels apparentés est parfaitement équivalente à celle qui sous-tendait le programme formaliste de Hilbert (1918, 1922, 1923, 1926, 1928, 1931), en ceci que cette dernière consistait, comme nous l'avons vu plus haut, en deux opérations complémentaires : premièrement, elle consistait à déduire « de nouvelles formules démontrables à partir des axiomes moyennant l'inférence formelle » (« *durch Gewinnung neuer beweisbaren Formeln aus den Axiomen mittels formalen Schließens* »), ainsi qu'à formuler de nouveaux axiomes, et, deuxièmement, à démontrer, à chaque nouvelle déduction, la consistance du système « par l'inférence contentuelle » (« *mittels inhaltlichen Schließens* ») (Hilbert 1923 ; Largeault 1992, p. 133). De manière spéculaire, dans son article de 1931, Gödel (1931) construit, d'une part, un système de formules logiques qui se fonde sur un certain nombre d'axiomes et qui est assorti de règles formelles qui permettent de déduire de nouvelles formules à partir de ces mêmes axiomes, en s'inspirant, en cela, du formalisme des *Principia Mathematica*, tandis que, d'autre part, il établit également une méthode de codage qui permet de traduire ces mêmes formules en nombres naturels, de telle manière qu'on puisse se servir de règles d'inférence contentuelles, de nature arithmétique, afin d'étudier les propriétés métamathématiques du système en question – et notamment la consistance de ses axiomes et la démontrabilité de telle ou telle formule particulière – directement au sein de ce dernier. C'est précisément pour une telle raison que la démonstration du fait que le système qu'avait construit Gödel (1931), en procédant d'une telle manière, ne permettait pas de démontrer, en son propre sein, une formule qui attestait de sa consistance, et cela précisément parce qu'il était effectivement consistant¹⁵⁶, a constitué un obstacle pour la réalisation du programme hilbertien, du moins tel qu'il

¹⁵⁶ L'argument que développe Gödel (1931) repose sur la relation biunivoque entre formules logiques et nombres naturels, d'une part, ainsi qu'entre énoncés métamathématiques et expressions arithmétiques, d'autre part, que l'on peut établir

dans le système P . Dans ses grands traits, il se déroule comme suit. Choisissons « une classe récursive de formules » (« *eine rekursive Klasse von Formeln* ») quelconque, k , qui peut être, par commodité, « la classe vide » (« *die leere Klasse* »). Écrivons une formule propositionnelle, « w », qui exprime, dans le langage de P , l'énoncé métamathématique « $Cons(k)$ », c'est-à-dire « la classe de formules k est consistante ». Il faut rappeler que, bien qu'elle représente un énoncé métamathématique, cette formule n'est, en tant que telle, rien d'autre qu'une expression arithmétique qui décrit une relation entre des nombres naturels. Afin qu'une classe de formules propositionnelles soit consistante, il faut et il suffit qu'il existe au moins une formule qui n'en soit pas une conséquence logique, car, par définition, une classe de prémisses contradictoires est telle parce qu'il est possible d'en déduire n'importe quelle conclusion. En conséquence, nous pouvons écrire que « $Cons(k) \equiv (\exists x)(Form(x) \ \& \ \overline{Dem}_k(x))$ », où « $(\exists x)(Form(x) \ \& \ \overline{Dem}_k(x))$ » est, à son tour, une formule propositionnelle de P qui, tout en consistant dans une expression arithmétique, exprime également un énoncé métamathématique, et notamment l'énoncé « il existe au moins un individu, c'est-à-dire un nombre naturel, x tel que x représente une formule et x n'est pas k -démontrable » en P (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 140-141). En effet, par les définitions mêmes que donne Gödel (1931), « $Form(x)$ » est un « signe de classe » [*'Klassenzeichen'*], c'est-à-dire une formule de P où ne figure qu'une seule et unique variable libre, qui désigne, justement, la classe de tous les nombres naturels qui sont associés à une formule de P (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 122). De même, « $\overline{Dem}_k(x)$ », c'est-à-dire « $(y) \overline{yD}_k x$ », est le signe de la classe de tous les nombres naturels x qui sont tels qu'il n'existe aucun autre nombre y qui soit associé à une k -démonstration des formules qu'ils représentent eux-mêmes (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 125), où par « k -démonstration » d'une formule donnée l'on entend une suite de formules – qui est associée aussi bien à une suite de nombres naturels qu'à un nombre naturel unique, toujours du fait de la relation biunivoque entre formules et nombres naturels qui existe en P – dont chacune est soit un axiome de P , soit une conséquence logique immédiate de deux formules précédentes, et qui permet de déduire la formule en question à partir des membres de la classe k . D'après le premier théorème, dit « d'incomplétude », que Gödel (1931) démontre dans ce même article, pour toute classe récursive de formules k , il existe « des signes de classe rékursifs » (« *rekursive Klassenzeichen* »), « r », tels que ni « $v \ Gen \ r$ » – c'est-à-dire la formule propositionnelle que l'on obtient en généralisant (« *Gen* ») le signe de classe « r » par rapport à la seule variable libre qui peut y figurer, « v », et donc en ajoutant à ce même signe le quantificateur universel (v) –, ni sa négation, « $Neg(v \ Gen \ r)$ », n'appartiennent à l'ensemble des conséquences logiques de k , c'est-à-dire « $Csq(k)$ », si bien qu'il s'agit de formules qui sont « k -indécidables » (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 127). En particulier, cela vaut pour le signe de classe rékursif contenant la variable libre associée au nombre 17, c'est-à-dire $x, r = Sb(q_{Z(p)}^{19})$, qui n'est rien d'autre que le signe de classe que l'on peut obtenir à partir du « signe de relation » (« *Relationszeichen* ») à 2 places – c'est-à-dire de la formule qui contient deux variables individuelles libres, notamment x et y – « q » en substituant le « signe numérique » (« *Zahlzeichen* »), ou chiffre, qui désigne le nombre naturel associé au signe de classe « p », « $Z(p)$ », à la variable qui est associée au nombre 19, c'est-à-dire y , tandis que le signe de classe « p » se définit, à son tour, de la manière suivante : $p = 17 \ Gen \ q$, c'est-à-dire comme étant la formule que l'on peut obtenir en généralisant le signe de relation « q » par rapport à la variable x (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 128). Le signe de relation « q » n'est, cependant, rien d'autre que le signe qui dénote la relation « $Q(x, y)$ » telle que « $Q(x, y) \equiv \overline{xD}_k[Sb(y_{Z(y)}^{19})]$ » (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 127), c'est-à-dire la classe des couples de nombres naturels (x, y) qui sont tels que x ne désigne aucune démonstration du chiffre du nombre qui est associé à y , c'est-à-dire qui sont tels que x n'est associé à aucune suite de formules qui constitue une k -démonstration de la formule qui correspond au numéro désigné par le chiffre « $Z(y)$ ». Il en découle que $r = \overline{xD}_k Z(p)$ désigne la classe des nombres naturels x qui ne représentent pas des k -démonstrations du

chiffre du nombre qui est associé au signe de classe « p », alors que $p = (x)\overline{x D_k [Sb(y_{Z(y)}^{19})]}$ est le signe de classe qui contient la variable libre y et qui désigne la classe des nombres naturels y dont le chiffre n n'est pas k -démontrable, c'est-à-dire la classe des nombres qui sont associés à des formules qui ne sont pas k -démontrables, toujours du fait de la relation biunivoque entre les formules de P et les nombres naturels qui y sont associées. Par conséquent, si l'on remplace, dans le signe de classe « p » lui-même, la variable y par le signe numérique qui désigne le nombre associé à « p », « $Z(p)$ », on obtient ce qui suit : $Sb(p_{Z(p)}^{19}) = (x)\overline{x D_k [Sb(y_{Z(p)}^{19})]} = (x) Sb(q_{Z(p)}^{19}) = (x) r = 17 Gen r$, si bien que « $17 Gen r$ » est une formule propositionnelle qui est associée au nombre naturel qu'identifie l'expression $Sb(p_{Z(p)}^{19})$ et que l'on peut interpréter, d'un point de vue métamathématique, comme signifiant que les formules de la classe à laquelle elle appartient elle-même, c'est-à-dire les formules de la classe p , ne sont pas k -démontrables. Il s'agit, en conséquence, d'une formule qui est démontrable, d'après les règles formelles de P , mais qui affirme, cependant, sa propre indémontrabilité. Le premier théorème de Gödel (1931) nous permet d'en conclure, en outre, que, bien qu'elle soit vraie si on la considère en tant qu'expression arithmétique, une telle formule est indécidable, pourvu que la classe k soit consistante, car la vérité de « $Dem_k(17 Gen r)$ » implique celle de « $\overline{Dem_k}(17 Gen r)$ », et inversement. En conséquence, nous pouvons choisir précisément la formule propositionnelle « $17 Gen r$ » comme formule k -indémontrable qui témoigne du fait que la classe k est consistante, c'est-à-dire qui nous permet d'écrire, en notation formelle, que

$$Cons(k) \rightarrow \overline{Dem_k}(17 Gen r)$$

Mais est-ce que cet énoncé métamathématique est démontrable dans le système P ? Afin de répondre à cette question, Gödel (1931) observe que, par définition, il est vrai que « $\overline{Dem_k}(17 Gen r) \equiv (x)\overline{x D_k(17 Gen r)}$ ». De plus, comme nous l'avons vu plus haut, $17 Gen r = Sb(p_{Z(p)}^{19})$, ce qui implique, toujours d'après les définitions que nous avons vues plus haut, que « $(x)\overline{x D_k(17 Gen r)} \equiv (x)\overline{x D_k Sb(p_{Z(p)}^{19})} \equiv (x) Q(x, p) \equiv 17 Gen Q(x, p) \equiv 17 Gen Sb(q_{Z(p)}^{19}) \equiv 17 Gen r$ ». Nous pouvons donc en conclure que l'énoncé métamathématique $Cons(k) \rightarrow \overline{Dem_k}(17 Gen r)$ est exprimable dans le système P , et notamment sous la forme suivante :

$$w Imp 17 Gen r$$

(Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 140-141), où « w » est, comme nous l'avons anticipé plus haut, la formule propositionnelle qui exprime l'énoncé métamathématique « $Cons(k)$ » dans le langage du système P , alors que « $x Imp y$ » est le signe de relation qui désigne, toujours en P , le connecteur logique « \rightarrow » et que Gödel (1931) définit récursivement à partir de signes élémentaires (Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 123). De plus, sur la base des considérations que nous venons de faire, nous pouvons également fournir une démonstration d'une telle formule au sein du système P lui-même. En effet, par la définition même de « $Cons(k)$ », nous pouvons écrire la formule « $w Imp \overline{Dem_k}(17 Gen r)$ », que nous pouvons transformer, ensuite, dans la formule « $w Imp 17 Gen r$ », en n'utilisant, à cet effet, que les définitions et les règles de substitution ou d'inférence dont se constitue la structure syntaxique de P . Il en découle que la formule « $w Imp 17 Gen r$ » est démontrable en P , et donc « a fortiori k -démontrable » (« *um so mehr k-beweisbar* »). Néanmoins, cela signifie que, si « w était k -démontrable, alors $17 Gen r$ le serait aussi, et il s'ensuivrait, par [le présupposé même que ' $Cons(k) \rightarrow \overline{Dem_k}(17 Gen r)$ ' et par la loi de contraposition], que k n'est pas consistant »

avait été envisagé tout au long des années 1920. Nous pouvons donc en conclure que les problématiques que le formalisme hilbertien a fini par léguer, en quelque sorte, aux empiristes logiques consistent essentiellement dans l'approfondissement et dans la transposition dans le domaine des sciences empiriques des questions logico-linguistiques et ontologico-épistémologiques que les auteurs des *Principia Mathematica* avaient déjà posées dans le cadre de leur propre projet de refondation des sciences formelles et mathématiques. Plus précisément, d'une part, les empiristes logiques ont hérité du programme hilbertien le problème de l'élaboration d'un formalisme qui s'applique à la totalité du corps des connaissances mathématiques et qui prenne la forme d'un langage-système permettant aux mathématiciens d'exploiter la puissance et la portée inférentielle des principes transfinis, tels que le principe mathématique de l'induction transfinie ou le principe logique du tiers exclu, tout en évitant de tomber dans des paradoxes, et plus précisément le problème de l'identification d'un « noyau finitiste », comme l'appelle Mancosu (2008), qui tient lieu de base inductive pour la formulation et la mise à l'épreuve des énoncés des mathématiques classiques ; d'autre part, ils en ont également hérité le problème de l'application de ce même langage mathématique à la reconstruction formelle des théories qui relèvent des sciences physiques, et plus généralement des sciences empiriques, dans le but de pouvoir s'en servir, comme fondement logico-mathématique, afin de construire un langage formel qui puisse remplir la fonction de langage universel de la science, tout en évitant, justement, d'estomper les différences de nature qui existent entre les théories qui relèvent des sciences formelles et les théories empiriques. Par conséquent, quelles sont les réponses que les empiristes logiques ont apportées à ces autres problèmes ? En quoi ont-elles fini par se concrétiser dans la conception classique des théories scientifiques, notamment telle qu'elle a été développée par Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) en tant que cadre métalinguistique et métathéorique ?

2.3 La conception classique des théories scientifiques : une extension du programme hilbertien d'axiomatisation des mathématiques ?

Afin de prendre la mesure de l'influence que les deux questions que nous venons d'évoquer – à savoir la question de la refondation du corps des connaissances mathématiques sur la base d'un langage finitiste et celle de l'élaboration d'un langage-système universel de la science, sous la forme d'un système axiomatique dépourvu de toute signification cognitive, pour ainsi dire, « *a priori* », à

(Gödel 1931 ; Nagel *et al.* 1989, p. 141), d'où, précisément, l'énoncé du second théorème, dit « d'incomplétude », de Gödel (1931).

l'exception de ses composantes purement logico-mathématiques, et auquel il était donc nécessaire d'attribuer, « *a posteriori* », une interprétation empirique – ont exercée sur la tradition de l'empirisme logique, il suffit d'analyser les paragraphes du *Manifeste du Cercle de Vienne* qui sont consacrés, respectivement, aux « directions de problèmes » (« *Problemrichtungen* ») qui étaient liées aux fondements de l'arithmétique et à celles qui étaient liées aux fondements de la physique. En ce qui concerne les premières, Carnap *et al.* (1929) y évoquent explicitement « les difficultés qui ont subsisté » (« *blieben jedoch gewisse Schwierigkeiten bestehen* ») même après la tentative de « dépasser » (« *Überwindung* ») la crise des fondements des mathématiques qu'avaient menée Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), et qui ont abouti, comme nous l'avons vu plus haut, aux controverses entre logicistes, formalistes et intuitionnistes. Plus précisément, les auteurs du *Manifeste* relèvent l'importance de ces controverses pour « la conception scientifique du monde » (« *die wissenschaftliche Weltauffassung* »), puisqu'ils estiment que leur objet n'était, en définitive, rien d'autre que la détermination de « la structure de la logique » (« *die Aufbau der Logik* »), en tant que socle de la structure du savoir en général. C'est précisément pour une telle raison que certains d'entre eux espèrent que

[les] traits essentiels [*wesentliche Züge*] [de ces trois tendances opposées] convergeront dans un développement ultérieur, et qu'elles finiront par être réunies dans la solution définitive [*in der schließlichen Lösung vereinigt sein werden*], probablement en exploitant les grandes idées de Wittgenstein [*wahrscheinlich unter Verwertung der weittragenden Gedanken Wittgensteins*] (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 116)¹⁵⁷.

Par « les grandes idées de Wittgenstein », Carnap *et al.* (1929) entendent ici, essentiellement, la « conception du caractère tautologique de la mathématique » (« *die Auffassung vom tautologischen Charakter der Mathematik* ») qu'ils avaient eux-mêmes élaborée à partir de la lecture du *Tractatus logico-philosophicus* et des *Principia Mathematica*, et qui constituait également le trait d'union entre leur vision des problèmes qu'avaient soulevés les recherches sur les fondements des mathématiques et leur vision des problèmes qui étaient liés aux fondements des sciences empiriques, en général, et de la physique, en particulier. Autrement dit, nous pouvons avancer que les membres du Cercle de Vienne voyaient dans la résolution des controverses entre les différentes positions au sujet de la refondation du corps des connaissances mathématiques une manière – en accord avec les deux dogmes de l'empirisme dont parlait Quine (1951, 1953) – d'asseoir une conception de ces mêmes

¹⁵⁷ Pour plus des précisions au sujet du rapport entre la conception philosophique du monde du Cercle de Vienne et les controverses sur les fondements des mathématiques, voir, par exemple, Goldfarb (1996, 2009) et Awodey et Carus (2007).

connaissances comme tautologies qu'il était possible d'utiliser pour « appliquer la méthode axiomatique » (« *die Anwendung der axiomatischen Methode* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 118) à la résolution des problèmes méthodologiques et épistémologiques que comportait toute tentative de formaliser la nouvelle vision des théories scientifiques que les avancées de la physique moderne étaient en train de faire émerger. Comme nous l'avons anticipé plus haut, en effet, quoiqu'ils s'accordassent pour reconnaître la valeur du programme hilbertien dans le domaine des sciences formelles, les membres du Cercle de Vienne étaient résolument opposés à toute tentative d'appliquer une telle démarche aux sciences physiques, car cela aurait comporté, justement, le risque d'obscurcir les fondements empiriques de ces dernières. Ils considéraient, par conséquent, que les sciences empiriques nécessitaient l'application d'une forme d'axiomatisation qui leur soit propre. Mais en quoi aurait pu consister une telle variante empirique de la méthode axiomatique, telle que l'avait définie Hilbert (1899, 1901, 1916, 1917) lui-même ? C'est afin d'apporter une réponse à cette question que, comme l'explique toujours Mormann (2007), les tenants du Cercle de Vienne se tournèrent vers les conventionnalistes français, tels que Pierre Duhem (1906) et Henri Poincaré (1902, 1905), dans le but de concilier les thèses au sujet de la nature symbolique des concepts et des lois scientifiques qu'avaient défendues ces derniers ¹⁵⁸ avec l'empirisme radical qu'avait prôné Ernst Mach (1883, 1886, 1905), d'après lequel les sensations constitueraient le fondement de tout savoir scientifique. Pour ce faire, ils comptaient se servir, précisément, d'une conception tautologique des concepts et des énoncés logico-mathématiques, qui leur permettrait, précisément, de faire la part des choses entre « les composants empiriques de la science » (« *die empirischen Bestandteile der Wissenschaft* ») et ses « composants purement conventionnels » (« *die bloß konventionellen* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 118), en opérant une formalisation complète de ces derniers. Nous pouvons donc en conclure que la conception classique des théories scientifiques, en tant que conception « orthodoxe » des théories scientifiques qui a caractérisé la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique, a été le produit d'une double synthèse, c'est-à-dire la synthèse entre logicisme, formalisme et intuitionnisme, d'une part, et celle entre conventionnalisme et empirisme « machien », d'autre part. Cela dit, en quoi consiste l'image de la reconstruction

¹⁵⁸ « Prenons une de ces lois, la loi de Mariotte, et examinons-en l'énoncé, sans nous soucier, pour le moment, de l'exactitude de cette loi. À une même température, les volumes occupés par une même masse de gaz sont en raison inverse des pressions qu'elle supporte ; tel est l'énoncé de la loi de Mariotte. Les termes qu'elle fait intervenir, les idées de masse, de température, de pression, sont encore des idées abstraites ; mais ces idées ne sont pas seulement abstraites, elles sont, de plus, symboliques, et les symboles qu'elles constituent ne prennent un sens que grâce aux théories physiques » (Duhem 1906 ; 2007, p. 234).

rationnelle, en tant qu'axiomatisation et formalisation *stricto sensu*, des théories scientifiques (empiriques) à laquelle ont abouti les tentatives d'effectuer cette double synthèse ?

Afin de répondre à une telle question, nous pouvons prendre en considération la manière dont Rudolf Carnap (1939) présente l'axiomatisation des théories physiques en tant que construction de

« calculs physiques » (« *physical calculi* ») (Carnap 1939, p. 56) – c'est-à-dire en tant que construction de calculs logiques qui sont pourvus d'un volet, pour ainsi dire, « physique » consistant en termes descriptifs qui appartiennent au langage de la physique, en axiomes qui sont propres à telle ou telle théorie physique, ainsi qu'en règles d'interprétation particulières, dont la fonction est, justement, d'interpréter les termes descriptifs qui relèvent de ce même volet du calcul – dans un ouvrage, datant

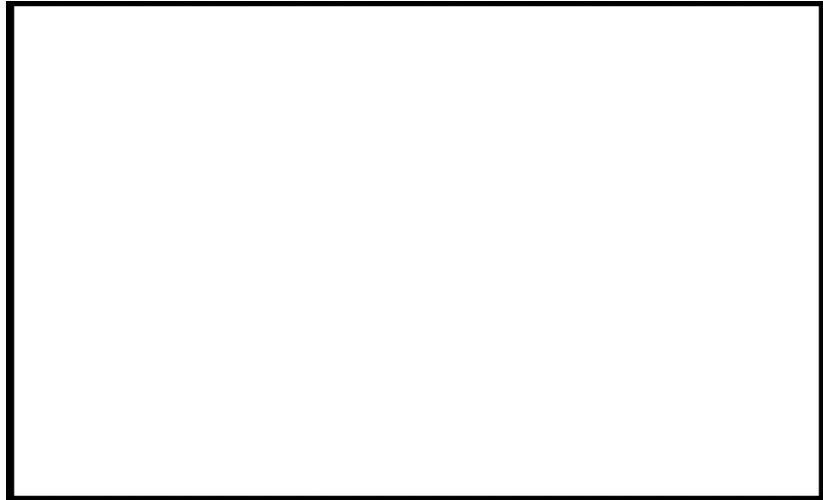


Figure 1 : Diagramme de l'architecture d'un calcul physique (Carnap 1939, p. 63)

de 1939, et intitulé « *Foundations of Logic and Mathematics* » (« *Fondements de la logique et des mathématiques* »). Comme on peut le constater en observant le diagramme à la figure (1), Carnap (1939) présente la structure d'un calcul physique comme consistant dans un système axiomatique qui s'étage sur plusieurs niveaux, auxquels correspondent des classes de termes descriptifs, relevant du langage de la physique, qui possèdent différents « degrés d'abstraction » (« *degrees of abstractness* »). Tout en bas, à la base de l'architecture du système axiomatique, l'on trouve, par exemple, ce que Carnap (1939) appelait les « termes élémentaires » (« *elementary terms* »), en ceci qu'ils sont associés au plus bas niveau d'abstraction considéré, c'est-à-dire les termes qui désignent directement les qualités perceptibles de tel ou tel objet, comme, par exemple, la propriété d'être « bleu » (« *blue* »), d'être « dur » (« *hard* »), d'être « chaud » (« *warm* »), etc., ainsi que les relations observables qui existent entre ces mêmes qualités, comme, par exemple, « *x est plus chaud que y* » (« *x is warmer than y* »), « *x est proche de y* » (« *x is contiguous to y* »), etc. (Carnap 1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000)¹⁵⁹. Au milieu, l'on trouve, en revanche, des termes qui renvoient à des propriétés et à des relations qui sont relativement faciles à identifier par le biais d'observations ou d'expériences empiriques, comme, par exemple, les termes « température »

¹⁵⁹ Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) adoptait, par conséquent, une définition du concept même d'« observable » (« *observable* ») qui était beaucoup plus phénoménaliste, au sens large du terme, que celles que défendaient d'autres tenants de la conception classique, tels que Herbert Feigl (1970) et Ernest Nagel (1961).

(« *temperature* ») ou « longueur » (« *length* »), alors que, tout en haut, se trouvent les termes les plus abstraits (« *abstract terms* »), qui désignent des entités, des propriétés et des relations non observables, tels que, par exemple, les termes « électron » (« *electron* »), « spin » (« *spin* ») ou « champ électrique » (« *electric field* ») (Carnap 1939, p. 63). Mais comment se construirait, du moins d'après Carnap (1939), un tel système de termes et d'énoncés ? La réponse que ce dernier a apportée à une telle question repose sur le rejet d'une conception purement empiriste de la construction et de l'interprétation des termes et des énoncés qui relèvent des sciences empiriques. Plus précisément, Carnap (1939) distinguait deux méthodes de construction d'un calcul physique, dont la première consiste en une approche « par le bas », c'est-à-dire qu'elle consiste à choisir des termes élémentaires comme « termes primitifs » (« *primitive terms* ») – et donc comme termes que l'on peut introduire dans le calcul sans qu'il soit nécessaire d'en donner une définition explicite en fonction d'autres termes – et « à introduire, à partir d'eux, d'autres termes pas à pas, jusqu'à aboutir aux termes dont le niveau d'abstraction est le plus élevé » (« *introducing on their basis further terms step by step, up to those of highest abstraction* ») (Carnap 1939, p. 63). Une telle méthode correspond précisément à une conception radicalement empiriste des théories scientifiques, que l'on pourrait comparer à celle de Mach (1883, 1886, 1905), et notamment à une conception d'après laquelle les termes abstraits ne seraient rien d'autre que des descriptions abrégées d'états de choses que l'on pourrait, à priori, caractériser de manière exhaustive au moyen exclusif de ce que Carnap (1939) appelait, précisément, les « termes élémentaires », conçus comme étant des descriptions directes de propriétés et de relations sensibles. C'est pourquoi, tout en reconnaissant la nécessité de mettre en valeur les fondements empiriques des théories physiques, Carnap (1939) rejetait une telle manière de les reconstruire en tant que calculs physiques, car elle lui semblait ne pas être à même de rendre compte de la manière dont sont formulées les lois physiques les plus abstraites.

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le chapitre précédent, Carnap (1936b, 1937, 1939, 1945a) était, en effet, de l'avis qu'il serait impossible de réduire complètement ces mêmes lois à des énoncés qui portent sur des régularités moins générales, bien qu'il considérât, tout de même, qu'une telle impossibilité serait la conséquence d'un constat empirique, et non pas d'une « nécessité logique » (« *logical necessity* ») (Carnap 1939, p. 64)¹⁶⁰. C'est ainsi que, dans son essai sur les fondements de

¹⁶⁰ « Certes, historiquement [*'historically'*], la science a commencé avec des lois qui étaient formulées dans des termes dont le niveau d'abstraction était faible [*'laws formulated in terms of a low level of abstractness'*]. Mais pour toute loi de ce genre, l'on a presque toujours trouvé, par la suite, telle ou telle exception et l'on a donc dû en restreindre la portée à un domaine de validité plus étroit [*'a narrower realm of validity'*]. Plus les physiciens sont montés en hauteur dans l'échelle des niveaux d'abstraction [*'in the scale of terms'*], plus ils ont réussi à formuler des lois qui s'appliquent à un large éventail de phénomènes [*'a wide range of phenomena'*] » (Carnap 1939, p. 64).

la logique et des mathématiques, Carnap (1939) opte pour l'autre méthode de construction qu'il présente, c'est-à-dire pour une méthode qui « part du sommet du système, pour ainsi dire, et descend ensuite à des niveaux d'abstraction toujours plus bas » (« *begins at the top of the system, so to speak, and then goes down to lower and lower levels* ») (Carnap 1939, p. 64). Autrement dit, il s'agit de choisir un petit nombre de termes abstraits comme termes primitifs et un petit nombre de lois générales comme axiomes, qui servent également de définitions implicites de ces mêmes termes – comme nous l'avons vu plus haut, dans le cas de l'axiomatisation hilbertienne de la géométrie –, afin d'en déduire des termes et des énoncés qui sont de moins en moins abstraits, jusqu'à atteindre le niveau des termes élémentaires, dont il est possible de donner une définition directe et exhaustive en fonction de qualités et de relations purement observables, en joignant ainsi les deux bouts du système axiomatique en question. Par conséquent, c'est précisément dans cette seconde méthode de construction d'un calcul physique que consistait l'application à la reconstruction des théories scientifiques de la synthèse épistémologique entre conventionnalisme et empirisme que tâchaient d'effectuer les tenants de l'empirisme logique, et dont les conséquences pour la représentation de la structure et du contenu de ces mêmes théories se reflètent dans le diagramme que trace Carnap (1939) dans *Foundations of Logic and Mathematics*, et que nous reproduisons à la figure (1). Cela dit, en quoi une telle méthode de construction d'un calcul physique était-elle également liée à l'autre synthèse qui a constitué le fondement de la conception classique des théories scientifiques, c'est-à-dire, comme nous venons de le voir, la synthèse entre logicisme, formalisme et intuitionnisme, et donc également aux questions logico-linguistiques et ontologico-épistémologiques qu'avaient soulevées les débats autour des *Principia Mathematica* ? En quoi a-t-elle constitué une réponse aux problèmes que le programme formaliste avait légués à la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique ? En quoi nous permettrait-elle de comprendre la conception de l'interprétation des théories empiriques, en tant que calculs logiques d'une nature particulière, que défendait Carnap (1939) et qui a fini par devenir partie intégrante de la conception classique des théories scientifiques ? Et en quoi nous permettrait-elle, également, de mettre au jour les liens qui existent entre le volet syntaxique d'une telle conception et son volet sémantique, c'est-à-dire de comprendre la manière dont la conception classique des théories scientifiques est en mesure de rendre compte des caractéristiques qui distinguent les théories empiriques des théories logico-mathématiques ?

Afin de répondre à ces questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.3.1), en quoi Carnap (1939) a tâché d'opérer une synthèse entre le logicisme, le formalisme et l'intuitionnisme en élaborant une conception du système des sciences formelles comme cadre linguistique, ainsi qu'une conception de la philosophie des mathématiques comme analyse logique du langage qui est propre à ces dernières. Nous verrons, notamment, en quoi une telle conception – qui se fondait sur deux

principes métathéoriques, que l'on pourrait appeler le « principe de tolérance syntaxique » et le « principe de tolérance sémantique » – lui a permis de réduire les questions logico-linguistiques et les questions ontologico-épistémologiques qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica* à des questions qui tiennent à l'analyse de la syntaxe logique des théories mathématiques, ainsi que de répondre au premier des deux problèmes que le programme formaliste avait légué à l'empirisme logique, c'est-à-dire le problème de montrer en quoi il était possible de justifier le programme hilbertien d'axiomatisation des mathématiques. Plus précisément, Carnap (1939) maintenait que le programme formaliste n'était qu'une parmi les différentes méthodes que l'on pouvait adopter pour reconstruire le cadre linguistique des mathématiques, en alternative à la méthode logiciste et la méthode intuitionniste, que l'on pouvait préférer à ces dernières pour des raisons purement pragmatiques. Cela nous permettra, cependant, d'en conclure que la manière dont Carnap (1939) a essayé d'intégrer la démarche axiomatique hilbertienne à sa propre conception de la reconstruction formelle de la science révèle l'une des faiblesses principales d'une telle démarche. Il se trouve, en effet, que la démarche axiomatique telle que la concevait Hilbert (1899, 1901, 1922, 1931) soulève le problème de l'interprétation du système d'axiomes que l'on peut choisir pour reconstruire telle ou telle théorie. C'est ainsi que, dans un second moment (section 2.3.2), nous verrons en quoi les tenants de l'empirisme logique, et notamment Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) lui-même, ont tâché de résoudre un tel problème, dont l'importance est d'autant plus grande qu'il constitue précisément ce qui relie le versant métasyntactique de la conception classique des théories scientifiques à son versant métasémantique. L'approche hilbertienne de l'axiomatisation en tant que construction de systèmes de formules qui sont, à priori, dépourvues de toute interprétation logique ou empirique permet, en effet, de saisir la forme du système de concepts qui sous-tend telle ou telle théorie, mais non pas, justement, la signification de ce même système. C'est ainsi que, tout comme il avait précédemment tenté de dissoudre, pour ainsi dire, « dialectiquement », l'opposition métaphysique et métascientifique entre rationalistes et empiristes classiques, d'une part, ainsi que celle entre logicistes, formalistes et intuitionnistes, d'autre part, Carnap (1939) a affronté la question de l'interprétation, et donc de la compréhension de la signification, des théories scientifiques dans le but de dissoudre, comme nous l'avons mentionné plus haut, l'opposition métaphysique et métascientifique entre une conception réaliste et une conception instrumentaliste des termes théoriques. C'est précisément dans le but d'effectuer une telle synthèse que Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par développer une théorie de l'interprétation du langage des sciences empiriques comme interprétation partielle, c'est-à-dire comme interprétation d'un langage, pour ainsi dire, « proprement théorique » en fonction d'un langage observationnel. De ces deux langages, seul le second serait interprété de manière directe et complète, en conformité une

conception opérationnaliste des concepts scientifiques, alors que la signification des termes qui figurent dans le premier dépendrait de la place qu'ils occupent dans la structure globale du système théorique en question. Nous pourrions donc en conclure que c'est précisément parce qu'elle préconise de se servir d'un langage formel partiellement interprété que la conception classique des théories scientifiques a été à même d'apporter une solution au second problème que le programme formaliste avait légué à l'empirisme logique, et que c'est toujours pour une telle raison qu'on peut la considérer comme étant une explicitation de la structure et du contenu des théories qui sont reconstruites à son instar. Plus précisément, la conception classique permet de rendre compte non seulement de la structure logico-syntaxique des théories en question, mais également de leur signification empirique, c'est-à-dire de ce qui les distingue des théories logico-mathématiques. C'est pourquoi il est possible de considérer la conception classique des théories scientifiques comme un cadre métathéorique et métalinguistique qui consiste en deux versants, à savoir en une théorie de l'axiomatisation et de la formalisation *stricto sensu*, qui en constitue le versant métasyntaxique, et une théorie de l'interprétation partielle, qui en constitue le versant métasémantique. Cela dit, en quoi pourrait-on la considérer comme étant également un exemple paradigmatique de cadre conceptuel ?

2.3.1 Le principe de tolérance syntaxique et le problème de tolérance sémantique : Rudolf Carnap et la dissolution dialectique des controverses autour des fondements des mathématiques

Afin de répondre à la question de savoir en quoi la conception de l'interprétation des théories scientifiques, reconstruites sous la forme de calculs logiques, que défendait Carnap (1939) était liée aux questions logico-linguistiques et ontologico-épistémologiques qu'avaient soulevées les débats autour des *Principia Mathematica* et que le programme formaliste avait léguées aux empiristes logiques, il est donc nécessaire d'analyser la manière dont Carnap (1939) lui-même a tâché d'effectuer une synthèse entre les positions respectives des logicistes, des formalistes et des intuitionnistes. Comme le suggère Michael Friedman (2009), la solution aux querelles sur les fondements des mathématiques que proposait Carnap (1939) se résume dans la citation suivante, issue de *Foundations of Logic and Mathematics* :

Il n'y a pas de vives controverses en ce qui concerne les mathématiques en tant que simple calcul logique [*as a pure calculus*]. Elles surgissent dès que l'on traite les mathématiques comme s'il s'agissait d'un système de 'connaissances' [*as a system of 'knowledge'*], c'est-à-dire, [pour emprunter les termes qu'utilisait Carnap (1939) lui-même], comme s'il s'agissait d'un système interprété [*as an interpreted*

system']. Or, si l'on regarde les mathématiques interprétées comme étant un outil de déduction dans le domaine de la connaissance empirique [*as an instrument of deduction within the field of empirical knowledge*'], plutôt que comme un système d'informations [*a system of information*'], alors l'on peut reconnaître que bien de ces questions controversées ne sont pas des questions de vérité, mais des questions d'efficacité technique [*questions not of truth but of technical expedience*']. La question est donc la suivante : quelle forme de système mathématique est-elle la mieux appropriée, en termes techniques, pour atteindre l'objectif visé ? Laquelle nous fournit le plus haut degré de certitude ? (Carnap 1939, p. 50).

Il en découle que, telles que les présente Carnap (1939) dans son ouvrage sur le fondement de la logique et des mathématiques, l'approche logiciste et l'approche formaliste peuvent être considérées comme autant de manières possibles de construire et d'interpréter un seul et même « calcul logico-mathématique » (« *logico-mathematical calculus* ») (Carnap 1939, p. 50) qui est censé formaliser le corps entier des connaissances mathématiques, du moment que les différends qui les opposaient se réduiraient, en dernière instance, à une question de priorité. Les logicistes avançaient, en effet, qu'il était nécessaire de construire, en priorité, la partie logique de ce même calcul et y attribuer une « interprétation normale » (« *normal interpretation* »)¹⁶¹ (Carnap 1939, p. 30). Leur but était, en effet, de se servir de ce volet logique pour interpréter, par la suite, le volet proprement mathématique du calcul en question, au moyen de quelques règles (purements syntaxiques) de transformation, internes au calcul lui-même, qui tiennent lieu de « règles de synonymie » (« *synonymity rules* »)¹⁶² (Carnap

¹⁶¹ Par « interprétation normale » de la partie logique du calcul logico-mathématique, Carnap (1939) entend ici l'interprétation usuelle des signes logiques qui apparaissent dans les énoncés de ce même calcul, et notamment l'interprétation usuelle des connecteurs logiques ou des quantificateurs universels et existentiels (soient p et q deux énoncés, l'énoncé « $p \wedge q$ » est vrai si et seulement si ni p , ni q ne sont faux, soient φ un prédicat et x une variable quelconque, l'énoncé « $\forall x \varphi(x)$ » est vrai si et seulement si tout élément du parcours des valeurs [*range of values* »] de x , c'est-à-dire de l'ensemble des objets que peut dénoter x , possède la propriété φ).

¹⁶² Dans *Foundations of Logic and Mathematics*, Carnap (1939) définit un certain nombre de règles de transformation pour les énoncés d'un calcul logique donné, dont la fonction consiste, de même que pour les C-règles dont il est question dans *Die logische Syntax der Sprache* (Carnap 1934), à formaliser les concepts syntaxiques de déduction et de démonstration, en tant que formes particulières de conséquence logique. Plus précisément, Carnap (1939) présente des règles qui servent à déterminer si un énoncé peut être considéré comme étant « primitif », c'est-à-dire comme n'étant « directement déductible » (« *directly derivable* ») d'aucun autre énoncé, et des « règles d'inférence » (« *rules of inference* »), qui permettent, justement, de formaliser le concept de « déductibilité directe » (« *direct derivability* »), à savoir une « règle d'implication » (« *rule of implication* »), pour ainsi dire, « générale », d'après laquelle « tout énoncé de la forme '---' est directement déductible d'énoncés de la forme '(si ..., alors ---) et (...)' », ainsi qu'une « règle de synonymie » (« *rule of synonymity* »), elle aussi, générale, d'après laquelle « deux termes sont synonymes si et seulement

1939, p. 19), et qui permettent, ainsi, de traduire des signes, ou termes, et des énoncés qui appartiennent à l'un des deux volets en signes, ou termes, et en énoncés qui relèvent de l'autre volet. Les formalistes maintenaient, en revanche, qu'il valait mieux construire les deux volets en même temps. Pour ce faire, ils proposaient, d'une part, de fournir une interprétation des différents signes logiques qui apparaissent dans le calcul par l'intermédiaire de ce que Carnap (1939) appelait, encore une fois, des « règles L-sémantiques » (« *L-semantic rules* ») (Carnap 1939, p. 9). D'autre part, ils proposaient également d'attribuer une interprétation directe aux signes primitifs qui sont propres au volet mathématique, tels que « 0 » et « ' » (qui n'est rien d'autre que le signe de la fonction « successeur »), par le biais de règles qui permettent de déterminer les objets ou les propriétés extralinguistiques que désignent ces mêmes signes¹⁶³, pourvu que l'on puisse démontrer, d'un point de vue métamathématique, la consistance des axiomes du calcul en question, une fois qu'on les a interprétés précisément d'une telle manière¹⁶⁴. Quant aux différences entre le système formaliste-

si tout énoncé S_2 que l'on peut former à partir d'un énoncé S_1 en remplaçant toutes les occurrences du premier terme par des occurrences du second est directement déductible de S_1 » (Carnap 1939, p. 18-19). Il en découle qu'une démonstration, dans le calcul en question, n'est rien d'autre qu'une suite d'énoncés de ce même calcul telle que « chacun d'entre eux est soit un énoncé primitif, soit un énoncé qui est directement déductible d'une ou de deux parmi les énoncés qui le précèdent dans ce même suite » (« *each of them is-either a primitive sentence or directly derivable from one or two sentences preceding it in the sequence* ») (Carnap 1939, p. 19).

¹⁶³ C'est-à-dire par le biais d'énoncés métalinguistiques tels que « le nom 'lune' désigne l'objet astronomique que l'on appelle communément 'lune' » ou « le prédicat 'bleu' désigne la propriété d'être bleu » (Carnap 1939, p. 9)

¹⁶⁴ Afin de donner un exemple concret, Carnap (1939) considère le « calcul mathématique élémentaire » (« *elementary mathematical calculus* ») qui correspond au « système d'axiomes classique de Peano (1889) pour l'arithmétique (élémentaire) » (« *classical axiom system of Peano for (elementary) arithmetics* »). Plus précisément, ce calcul peut être vu comme une extension d'un calcul logique de base qui contient « le calcul fonctionnel inférieur » (« *lower functional calculus* ») – c'est-à-dire le calcul de la logique des prédicats du premier ordre – ainsi qu'une partie du « calcul fonctionnel supérieur » (« *higher functional calculus* ») – c'est-à-dire une partie du calcul de la logique des prédicats d'ordre supérieur au premier – doté du signe d'égalité « = », et notamment la partie dont les expressions d'ordre supérieur au premier sont du type « pour tout F », où « F » est une variable dont le parcours de valeurs (« *range of values* ») – c'est-à-dire l'ensemble des objets qu'elle peut dénoter – coïncide avec l'ensemble des prédicats du calcul fonctionnel inférieur (Carnap 1939, p. 39). Les signes mathématiques qui permettent d'étendre le calcul logique de base sont, notamment, « b », « N », « ' » », tandis que les axiomes de Peano (1889) sont les suivants :

P 1. b est un N .

P 2. Pour tout x , si x est un N , alors x' est un N .

P 3. Pour tout x, y , si [x est un N et y est un N et $x' = y'$] alors $x = y$.

P 4. Pour tout x , si x est un N , alors, non $b = x'$.

P 5. Pour tout F , si [b est un F et, pour tout x [si x est un F alors x' est un F]] alors [pour tout y , si y est un N alors y est un F]. (Ce qui veut dire que, si F est une propriété de b qui se transmet de x à x' , alors tous les éléments qui sont des N sont également des F)

(Carnap 1939, p. 39). L'« interprétation habituelle » (« *customary interpretation* ») (Carnap 1939, p. 40) des axiomes de Peano (1889) s'obtient, par conséquent, en introduisant les règles L-sémantiques qui permettent de formaliser la manière dont on interprète, usuellement, les signes logiques qui apparaissent dans ces mêmes axiomes (comme, par exemple, les signes « pour tout » ou « non »), ainsi que des règles sémantiques qui permettent d'explicitier la signification qu'on attribue communément aux termes primitifs mathématiques qui y figurent et qui sont, notamment, les suivants : « b désigne l'entier naturel 0 » ; « pour tout x , x est un N si et seulement si x est un entier naturel » ; « pour tout x , si x est un N , x' désigne l'entier naturel successif, $x + 1$ ». Une interprétation « formaliste » du calcul mathématique dont les axiomes de Peano (1889) constituent les fondements consisterait, ainsi, à déterminer la signification des signes primitifs mathématiques qui y apparaissent d'une manière substantiellement identique à celle dont on les interprète habituellement, à condition que l'on puisse démontrer la consistance de ces mêmes axiomes, ainsi interprétés, d'un point de vue métamathématique, et donc « finitiste ». Pour ce faire, comme l'écrivait Hilbert (1931) lui-même, il est nécessaire d'identifier des schémas de démonstrations, ou « dessins-démonstrations » (« *Beweisfiguren* »), qui permettent de formaliser les conclusions logiques que l'on peut tirer des axiomes en question, ainsi qu'une « procédure déterminée » (« *ein bestimmter Verfahren* ») permettant de réduire les formules qui apparaissent dans ces mêmes démonstrations à des « formules numériques » (« *numerische Formeln* ») finies du type $a = b + 1$, où a et b sont des nombres naturels quelconques, c'est-à-dire permettant d'appliquer ces mêmes formules à un ensemble fini de nombres naturels. Ce faisant, l'on peut établir une procédure par laquelle il est possible de se servir des règles d'inférences de la mathématique contentuelle, telles que le principe d'induction finie ou la règle de récursion primitive, afin de démontrer que tous les schémas de démonstrations que l'on peut associer aux axiomes de Peano (1889), lorsqu'on les considère dans leur interprétation habituelle, se réduisent à des identités numériques, comme, par exemple, $1 = 1$. C'est précisément une telle procédure qui nous autorise, toujours d'après Hilbert (1931), à en conclure que de tels axiomes sont mutuellement consistants, et donc que leur interprétation habituelle est valide. Une preuve de la consistance des axiomes de Peano (1889) qui se fonde des présupposés similaires, mais qui fait usage de règles d'inférences plus puissantes que celles de l'arithmétique, telles que l'induction transfinitie, dans le but de contourner les implications du second théorème de Gödel (1932), a été fournie, par exemple, par Gerhard Gentzen (1936). Plus précisément, comme le remarquent Ernest Nagel *et al.* (1989), « la démonstration de Gentzen [1936] repose sur le classement de toutes les démonstrations arithmétiques dans un ordre linéaire, selon leur degré de 'simplicité'. Ce classement s'avère posséder une structure du type d'un certain 'ordinal transfini' [de Cantor (1883)]. On obtient la démonstration de consistance en appliquant à cet ordre linéaire une règle d'inférence appelée 'principe d'induction transfinitie'. Le raisonnement de Gentzen [(1936)] ne peut être projeté sur le formalisme de l'arithmétique. En outre, bien que la plupart des chercheurs ne mettent pas en doute que cette démonstration soit contraignante, elle n'est pas finitiste au sens des exigences initiales de Hilbert [(1928, 1931)] pour une démonstration de consistance absolue » (Nagel *et al.* 1989, p. 91n2), c'est-à-dire pour une démonstration de consistance qui n'implique pas la réduction de tel ou tel domaine formalisé des mathématiques à un autre domaine. D'un point de vue « logiciste », en revanche, les signes primitifs mathématiques des axiomes de Peano (1889) s'interprètent en les traduisant en signes du calcul fonctionnel supérieur, normalement interprété, par l'intermédiaire d'un ensemble de règles de synonymie entre expressions d'un calcul K_2 et « expressions corrélées » (« *correlated expressions* ») d'un autre calcul,

logiciste, d'une part, et l'approche intuitionniste, d'autre part, Carnap (1939) estimait qu'elles tenaient à la nature des axiomes, des définitions et des règles d'inférence que l'on pourrait considérer comme acceptables dans le cadre d'un calcul logico-mathématique donné. Comme nous l'avons vu plus haut, les intuitionnistes maintenaient, en effet, que tout énoncé mathématique devait être de nature contentuelle – c'est-à-dire qu'il devait porter sur le contenu d'une « intuition pure » (« *pure intuition* ») (Carnap 1939, p. 50) et non pas sur les propriétés logiques qu'expriment les formules d'un certain langage formel – et que toute inférence devait être « constructive » (« *constructive* ») (Carnap 1939, p. 50) – c'est-à-dire qu'elle devait consister dans la construction d'une certaine entité mathématique, à partir d'une autre entité déjà connue et par l'intermédiaire d'un nombre fini d'opérations bien déterminées. C'est pourquoi, toujours dans *Foundations of Logic and Mathematics*, Carnap (1939) peut traduire les positions logico-linguistiques et ontologico-épistémologiques, au sujet des fondements des mathématiques, des intuitionnistes par un ensemble de contraintes qu'il serait nécessaire d'imposer aux règles (syntaxiques) de formation et de transformation de formules, ainsi qu'aux règles (sémantiques) d'interprétation de ces mêmes formules qui caractérisent le corps des connaissances mathématiques en tant que calcul logico-mathématique. Cela lui permet d'en conclure que la version logiciste-formaliste de ce même calcul « est beaucoup plus simple et techniquement plus efficace » (« *is much simpler and technically more efficient* »), alors que sa version intuitionniste « est mieux à l'abri d'événements imprévus, comme, par exemple, les

K_1 , qui remplissent les trois conditions suivantes : (1) tout énoncé qui est C-vrai [*'C-true'*] en K_2 [c'est-à-dire que l'on peut démontrer en tant que théorème de K_2 sur la base des règles syntaxiques de transformation qui sont propres à ce même calcul] devient C-vrai en K_1 , une fois qu'il est traduit [*'if translated'*] ; (2) tout énoncé qui est C-faux [*'C-false'*] en K_2 [c'est-à-dire tout énoncé dont on peut démontrer, toujours de manière syntaxique, la négation en tant que théorème de K_2] devient C-faux en K_1 ; (3) si la relation de C-implication [*'C-implication'*] en K_2 s'applique à quelques énoncés donnés [c'est-à-dire si, en K_2 , l'on peut déduire l'un ou plusieurs parmi ces mêmes énoncés à partir des autres, et cela d'après la règle syntaxique suivante : l'on peut déduire l'expression 'y' directement de la combinaison des expressions 'si x, alors y' et 'x'], alors la relation de C-implication en K_1 s'applique aux corrélés de ces derniers après qu'ils ont été traduits » (Carnap 1939, p. 40). Il s'ensuit que, « si l'on dispose d'une interprétation I_1 pour le calcul K_1 , alors la traduction des expressions de K_2 en expressions de K_1 définit, en connexion avec I_1 , une interprétation I_2 pour K_2 . L'on peut appeler I_2 une *interprétation secondaire* [*'secondary interpretation'*] » du calcul K_2 (Carnap 1939, p. 40). En outre, « si [les règles de traduction en question remplissent bien de telles conditions] et l'interprétation (primaire) I_1 est vraie, alors [l'interprétation secondaire] I_2 est également vraie » (Carnap 1939, p. 40). Par conséquent, si l'on choisit comme corrélés des signes primitifs « b », « ' » et « N » les signes « 0 », « + » et « nombre cardinal fini » (« *finite cardinal number* »), c'est-à-dire des signes que l'on peut interpréter dans le calcul fonctionnel supérieur, par le biais d'une chaîne de définitions qui reposent sur l'interprétation normale du calcul fonctionnel inférieur (Carnap 1939, p. 34-37), alors on peut obtenir, par traduction, une interprétation secondaire, de nature purement logique, des axiomes de Peano (1889), qui est tout de même équivalente à leur interprétation habituelle (voir Carnap 1939, p. 41-42).

contradictions » (« *is more safe from surprising occurrences, e.g., contradictions* ») (Carnap 1939, p. 51)¹⁶⁵, précisément en ceci qu'elle permet de concevoir les règles syntaxiques et sémantiques propres à un tel système d'énoncés comme étant des lois de construction d'objets et de concepts mathématiques qui se réduisent à des suites finies de formules.

En conséquence, c'est précisément dans un tel arbitrage entre efficacité et certitude que consiste ce qu'entendait Carnap (1939) lorsqu'il évoquait, comme nous venons de le voir, la possibilité de réduire les controverses sur les fondements des mathématiques à des questions d'efficacité technique. Il en découle que la solution que ce dernier entendait apporter aux controverses entre logicistes, formalistes et intuitionnistes reposait, encore une fois, sur la manière dont il concevait le dogme de l'analyticité et le dogme du réductionnisme comme synthèse entre une vision empiriste et une vision rationaliste du savoir. Plus précisément, elle se résumait à la thèse suivante : même lorsqu'on les considère comme étant un système axiomatique d'énoncés, que l'on peut interpréter de telle ou telle manière, les mathématiques restent un ensemble de formules qui ne sont pourvues d'aucun contenu de connaissance, si bien qu'elles constituent non pas un « système d'informations » (« *system of information* »), mais tout simplement « un outil de déduction dans le domaine de la connaissance empirique » (« *an instrument of deduction within the field of empirical knowledge* ») (Carnap 1939, p. 50). Une telle conclusion implique, par conséquent, une « conception du caractère tautologique de la mathématique » en tant que système d'énoncés qui n'ont pas de contenu objectif en eux-mêmes, mais qui servent uniquement à établir des relations formelles (le cas échéant, de nature déductive) entre concepts ou entre énoncés, c'est-à-dire une conception de la mathématique telle que celle qu'avait élaborée Wittgenstein (1922) et que Carnap (1928) avait lui-même mise au fondement du programme de reconstruction rationnelle du savoir qu'il avait esquissé dans *La Construction logique du monde*, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Elle implique, en outre, l'idée que les différences entre les trois manières d'envisager les mathématiques qu'incarnaient, respectivement, le logicisme, le formalisme et l'intuitionnisme ne seraient pas de nature théorique et cognitive, mais de nature pragmatique, en ceci qu'elles auraient trait à l'opportunité de choisir telle ou telle manière de construire un système d'énoncés mathématiques en fonction du but visé – si bien que, d'un tel point de vue, il serait préférable d'adopter une approche formaliste ou logiciste au cas où l'on privilégierait l'efficacité technique, alors que, si l'on visait à écarter toute possibilité de tomber dans une contradiction au cours de telle ou telle démonstration, il serait plus judicieux de choisir une approche intuitionniste. Nous pouvons donc en conclure que, tout comme la tentative de concilier les thèses de

¹⁶⁵ Pour plus de précisions sur l'évolution des vues de Carnap (1939) au sujet du programme intuitionniste, voir Goldfarb (2009).

l'empirisme classique et celles du rationalisme que Carnap (1928, 1961b) avait effectuée dans *La Construction logique du monde* s'était traduite par une conception du système des sciences empiriques comme cadre linguistique, la tentative d'effectuer une synthèse entre logicisme, formalisme et intuitionnisme à laquelle s'attelle ce dernier dans ses *Foundations of Logic and Mathematics* (Carnap 1939) aboutit à une conception du système de la logique et des mathématiques, c'est-à-dire du système des sciences formelles, comme consistant, lui aussi, dans un cadre linguistique, et donc, de manière tout à fait complémentaire, à une conception de la philosophie des mathématiques comme cadre métalinguistique et métathéorique pour l'élaboration de ce même système. Plus précisément, nous pouvons interpréter une telle conception des sciences formelles comme étant le résultat de l'intégration de l'axiomatisation, telle que l'entendait Hilbert (1899, 1901, 1922, 1931), à l'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir scientifique qui constituait, comme nous l'avons vu plus haut, le fondement même de la vision carnapienne de l'activité scientifique comme construction de cadres linguistiques. Cela dit, comment s'est opérée une telle intégration ? En d'autres termes, en quoi pourrait-on identifier les présupposés de l'intégration de l'axiomatisation hilbertienne à la conception plus générale des sciences – formelles et empiriques – que défendait Carnap (1928, 1932, 1934, 1936b, 1937, 1939, 1945a, 1961b), justement, dans l'approche syntaxique de la reconstruction rationnelle du savoir que ce dernier avait lui-même développée ? De plus, en quoi Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a-t-il essayé d'appliquer la démarche hilbertienne (telle qu'il l'avait lui-même réinterprétée) au problème de l'axiomatisation et de la formalisation des sciences empiriques, tout en veillant à ne pas estomper les différences qui existent entre les théories scientifiques et les théories mathématiques, notamment en ce qui concerne leur interprétation sémantique ?

Afin de répondre à de telles questions, nous pouvons observer que l'intégration de l'axiomatisation hilbertienne à la conception carnapienne de la science n'est, en définitive, rien d'autre que la conséquence logique de ce que Carnap (1934) lui-même appelait « le principe de tolérance de la syntaxe » (« *der Toleranzprinzip der Syntax* »), et qu'il décrivait dans ces termes : lorsqu'il s'agit de choisir tel ou tel système syntaxique (c'est-à-dire tel ou tel ensemble de règles de formation, de transformation et d'inférence) « nous ne voulons pas imposer des interdictions [*'Verbote aufstellen'*], mais proposer des dispositions [*'Festsetzungen treffen'*] » (Carnap 1934, p. 44-45). En d'autres termes, Carnap (1934) considérait que chaque scientifique, ou chaque philosophe, serait libre de choisir le système syntaxique qui lui semblerait convenir le mieux à la formalisation de telle ou telle théorie. De plus, ce même principe de tolérance syntaxique était associé, toujours chez Carnap (1934, 1950b), à ce qu'on pourrait appeler, par analogie, un « principe de tolérance sémantique », dont le but était d'apporter une réponse à la question de savoir à quelles conditions il serait permis d'accepter l'usage

de formes linguistiques qui semblent faire référence à des entités abstraites, et que Carnap (1950b) lui-même résume – dans un article plus tardif, intitulé « *Empirisme, sémantique et ontologie* » (« *Empiricism, Semantics and Ontology* ») – de la manière suivante : « *Soyons circonspects quand il s'agit de faire des assertions et critiques quand il s'agit de les examiner, mais tolérants quand il s'agit d'autoriser des formes linguistiques* » (« *Let us be cautious in making assertions and critical in examining them, but tolerant in permitting linguistic forms* ») (Carnap 1950b ; Carnap 1997, p. 335). En conséquence, c'est précisément un tel principe qui l'amenait à critiquer des positions empiristes et nominalistes telles que celles que défendait Gilbert Ryle (1949) lorsqu'il considérait des affirmations métalinguistiques, de nature sémantique, du type « le mot 'rouge' désigne une propriété des choses » (« *The word 'red' designates a property of things* ») comme étant dépourvues de sens. Plus précisément, Ryle (1949) maintenait que, bien que l'on puisse utiliser le mot « rouge » comme étant une expression douée de signification dans le contexte de tel ou tel énoncé, il n'existerait tout de même aucune entité abstraite, c'est-à-dire aucune « propriété de la rougeur » (« *Redness* »), que l'on pourrait mettre en correspondance avec le mot « rouge » en vertu d'une quelconque « relation de désignation » (« *relation of designation* ») (Carnap 1950b ; Carnap 1997, p. 328). Carnap (1950b) considérait que le refus que Ryle (1949) opposait à la possibilité d'admettre que des énoncés sémantiques comme celui que nous venons de citer possèderaient une signification cognitive découlait d'une équivoque, puisqu'il estimait que, lorsqu'on affirme que « le mot 'rouge' désigne une propriété des choses », on ne serait pas en train de proférer une affirmation métaphysique, qui porterait sur l'existence d'un système de choses appelées « propriétés » (« *properties* »), dont la rougeur ferait, justement, partie. Bien au contraire, toujours d'après Carnap (1950b), l'on serait tout simplement en train d'introduire une nouvelle expression, c'est-à-dire le mot « rouge », dans un certain « cadre linguistique » (« *linguistic framework* ») (Carnap 1950b), que nous pourrions définir, encore une fois, comme étant un système d'énoncés, formulés dans un certain langage symbolique, ainsi que de règles syntaxiques et de règles sémantiques.

Afin d'introduire une nouvelle expression dans un certain cadre linguistique, poursuit Carnap (1950b) dans ce même article, il n'est donc pas nécessaire, comme le prétendaient à la fois les empiristes-nominalistes, tels que Gilbert Ryle (1949), et leurs adversaires rationalistes, de trancher la question de savoir si les formes linguistiques en question correspondent à des choses qui existeraient indépendamment du langage que l'on est en train d'utiliser. Il suffit, tout simplement, d'étendre le cadre dont on dispose déjà, et dont il faudrait reconnaître qu'il a été lui-même choisi, à l'origine, pour des raisons purement pragmatiques – c'est-à-dire, encore une fois, par « efficacité technique » – et non pas cognitives, si bien qu'il serait inutile de s'appuyer sur des arguments scientifiques, voire métaphysiques, afin de justifier l'introduction ou l'usage de telle ou telle expression. C'est pourquoi,

parallèlement à la distinction « syntaxique » entre questions logiques et questions d’objets, Carnap (1950b) introduit, toujours dans *Empirisme, sémantique et ontologie*, une distinction « sémantique » entre deux types de questions portant sur l’existence des entités qui sont supposées constituer les signifiés des nouvelles expressions que l’on est en train d’introduire dans tel ou tel cadre linguistique :

d’abord, les questions portant sur l’existence de certaines entités de ce nouveau genre à l’intérieur du cadre [*‘within the framework’*]; nous les appelons les *questions internes* [*‘internal questions’*]; en second lieu, les questions portant sur l’existence ou la réalité du système d’entités pris comme un tout [*‘the system of entities as a whole’*], que nous appelons les *questions externes* [*‘external questions’*]. Les questions internes, comme les réponses qu’on peut leur apporter, sont formulées à l’aide des nouvelles formes d’expression. Les réponses peuvent être trouvées soit par des méthodes purement logiques [*‘by purely logical methods’*], soit par des méthodes empiriques [*‘by empirical methods’*], selon que le cadre est de nature logique ou factuelle (Carnap 1950b ; Carnap 1997, p. 315).

Il s’ensuit que, afin d’attribuer une signification scientifique à des questions d’existence que l’on pourrait, de premier abord, considérer comme étant de nature purement métaphysique, il suffit de les traduire par des questions internes à un cadre linguistique donné, en étendant, si nécessaire, ce dernier. Pour effectuer une telle extension, écrivait toujours Carnap (1950b), il faut accomplir deux opérations majeures. La première consiste à introduire dans le langage du cadre en question « un terme général [*‘a general term’*], un prédicat de niveau supérieur [*‘a predicate of higher level’*], pour le nouveau genre d’entités, nous permettant de dire d’une entité particulière quelconque qu’elle appartient à ce genre [*‘permitting us to say for any particular entity that it belongs to this kind’*] » (Carnap 1950b ; 1997, p. 324), tel que, dans notre exemple particulier, le prédicat « être une propriété des choses », qui est associé au terme général « propriété des choses » et dont le parcours de vérité se compose, précisément, de termes qui désignent des propriétés de choses, comme « rouge », « dur », etc.. La seconde opération consiste, par conséquent, dans « l’introduction de variables d’un nouveau type [*‘variables of the new type’*]. Les nouvelles entités sont les valeurs de ces variables [*‘The new entities are values of these variables’*], auxquelles les constantes [*‘constants’*] ...sont substituables. À l’aide des variables, on peut formuler des énoncés généraux concernant [*‘general sentences’*] les nouvelles entités » (Carnap 1950b ; 1997, p. 325), comme, par exemple, les énoncés « *x* est une propriété des choses », « *x* est un nombre » ou « *x* est un énoncé ». Autrement dit, dans une telle perspective, les termes « rouge », « dur », etc. ne seraient rien d’autre que des constantes que l’on pourrait substituer aux valeurs des variables qui représentent, au sein du cadre linguistique en question, ces nouvelles entités que sont les propriétés des choses, c’est-à-dire aux valeurs des variables qui constituent le

parcours de vérité du prédicat d'ordre supérieur, associé au terme général « propriété des choses », « être une propriété des choses ». Il s'ensuit que, chaque fois qu'on affirme, dans le contexte du métalangage (sémantique) qui a pour objet le langage formel du cadre en question, que « le mot 'rouge' désigne une propriété des choses », l'on se limite à indiquer, de manière explicite, l'une des valeurs possibles de la variable x que l'on retrouve dans l'énoncé général « x est une propriété des choses », en se servant du mot « rouge » comme d'une constante qui peut remplacer, justement, une telle valeur.

L'on peut donc en conclure que, toujours selon Carnap (1950b), une affirmation telle que « le mot 'rouge' désigne une propriété des choses » ne doit pas être interprétée comme une affirmation existentielle, de nature théorique ou métaphysique. Il s'agirait, en revanche, d'une règle sémantique dont la fonction consisterait à déterminer les conditions de vérité du mot « rouge » (ou, plus précisément, les conditions de vérité de l'énoncé « rouge est une propriété des choses »), par rapport au cadre linguistique dans lequel ce dernier a été introduit : en d'autres termes, l'énoncé, relevant d'un certain métalangage sémantique, « le mot 'rouge' désigne une propriété des choses » peut être considéré comme étant équivalent à l'énoncé, issu de ce même métalangage, « l'énoncé 'rouge est une propriété des choses' est vrai si et seulement si le terme 'rouge' est une constante de prédicat du langage formel en question et il appartient au parcours de vérité du prédicat 'être une propriété des choses', qui est d'ordre supérieur à celui que désigne le terme 'rouge' lui-même »¹⁶⁶. C'est ainsi

¹⁶⁶ Comme l'observait Wilfrid Sellars (1963), il existe un parallèle étroit entre la manière dont Carnap (1942) concevait la sémantique d'un langage objet donné, ou plus précisément la structure du système sémantique que l'on peut associer à ce même langage objet, et la structure des théories scientifiques en tant que calculs logiques partiellement interprétés. Plus précisément, Carnap (1942) dressait une distinction entre la « sémantique pure » (« *pure semantics* ») d'un langage donné, en tant que système de formules sémantiques qui sont dépourvues de toute interprétation, et sa « sémantique descriptive » (« *descriptive semantics* »), en tant que système de formules sémantiques qui sont interprétées de telle sorte qu'elles expriment une « relation factuelle » (« *factual relation* »), de nature pragmatique, entre un terme descriptif qui dénote un objet linguistique et un terme descriptif qui dénote un objet non linguistique (Sellars 1963, p. 462-463). Pour ne faire qu'un exemple, la formule non interprétée du système sémantique que l'on peut associer à la langue allemande, en tant que langage objet, et que nous formulons en nous servant du français, comme métalangage, « Le mot ' φ ' désigne a » relève de la sémantique pure de cette même langue. En conséquence, si nous y attribuons une certaine interprétation, en remplaçant, par exemple, le signe (non interprété) « φ » par le terme descriptif « Hund » (qui dénote le mot allemand « Hund » en tant qu'objet linguistique) et le signe (non interprété) « a » par le terme descriptif « un chien » (qui dénote un chien en tant qu'animal, c'est-à-dire en tant qu'objet non linguistique), nous obtenons la formule interprétée, et donc l'énoncé, « Le mot 'Hund' désigne un chien », qui relève, justement, de la sémantique descriptive de la langue allemande. Un tel énoncé exprime, par conséquent, la relation factuelle (mais non physico-causale) entre le terme descriptif « Hund » et le terme descriptif « un chien » que l'on peut établir par l'intermédiaire d'un énoncé qui remplit une fonction analogue à celle que l'on peut attribuer aux règles de correspondance dans le cadre de la reconstruction formelle des théories

qu'une telle méthodologie permet, toujours d'après Carnap (1950b), d'introduire dans un cadre linguistique donné non seulement un terme comme « propriété des choses », mais également des termes généraux beaucoup plus abstraits, comme les mots « électron » (« *electron* »), « champ magnétique » (« *magnetic field* ») ou « nombre premier » (« *prime number* »), sans qu'il soit nécessaire de se soucier du statut ontologique de leurs possibles référents externes¹⁶⁷. Plus précisément, en traitant le terme général « propriété des choses » de manière sémantique, et non pas ontologique, Carnap (1950b) est donc parvenu à réduire la question métaphysique de savoir s'il existe des propriétés en tant qu'entités abstraites à la question empirique et factuelle d'identifier la manière dont on pourrait établir une taxonomie des objets qui constituent le domaine d'application du cadre linguistique en question sur la base de la manière dont les différentes propriétés des choses sont définies au sein de ce dernier¹⁶⁸. Il en découle que, aussi bien en ce qui concerne les sciences empiriques qu'en ce qui concerne les sciences formelles, la synthèse entre empirisme, ou nominalisme, et rationalisme qu'entendait effectuer Carnap (1928, 1934, 1939, 1950b), ainsi que la manière dont il visait à réconcilier le dogme de l'analyticité et le dogme du réductionnisme se concrétisaient, chez lui, dans une vision du savoir scientifique comme cadre linguistique, voire comme ensemble de cadres linguistiques alternatifs. Dans une telle perspective, tout problème véritablement philosophique, c'est-à-dire de nature logico-linguistique ou ontologico-épistémologique, se réduirait, ainsi, à un problème qui concernerait le fonctionnement du cadre que l'on a choisi pour représenter les informations dont on dispose au sujet de tel ou tel domaine du savoir, alors que tout problème scientifique se réduirait, à son tour, à une question que l'on peut formuler au sein du cadre linguistique pertinent. Quant à la question de choisir un cadre particulier parmi un certain nombre d'options alternatives, elle se réduirait, toujours selon Carnap (1950b), à une question de nature pragmatique, et non pas de nature théorico-cognitive. En conséquence, c'est précisément grâce aux deux principes de tolérance dont nous venons de parler (c'est-à-dire le principe de tolérance syntaxique et le principe de tolérance sémantique) que Carnap (1934, 1939, 1950b) est parvenu à

scientifiques, c'est-à-dire par un énoncé qui est de la forme « Au sein de la communauté linguistique allemande, on se sert, généralement, du mot 'Hund' pour désigner un chien » et qui relève, ainsi, de la pragmatique de la langue allemande. Pour plus de précisions à ce sujet, voir Carnap (1963, p. 924-926).

¹⁶⁷ Il s'agit, en d'autres termes, d'une méthodologie qui permet de réduire l'ontologie d'un langage donné à sa (méta)sémantique, en réduisant les objets dont ce même langage semble présupposer (ou, à mieux dire, accepter) l'existence aux valeurs des variables qui y figurent, et dont Carnap (1950b) lui-même attribue, en quelque sorte, la paternité à Quine (1939, 1943, 1947).

¹⁶⁸ En conséquence, du point de vue d'une telle taxonomie, le terme « propriété des choses » ne désigne, en tant que prédicat d'ordre supérieur, rien d'autre qu'une classe de classes qui tient lieu de *genus*, alors que les classes que définissent les prédicats d'ordre inférieur « rouge », « dur », etc. en constituent les différentes *species*.

montrer en quoi il était possible de concilier le logicisme, le formalisme et l'intuitionnisme dans le contexte d'une conception des sciences formelles comme cadres linguistiques. En outre, c'est par ce même biais qu'il a également réussi à réduire les questions logico-linguistiques et les questions ontologico-épistémologiques qu'avaient soulevées les *Principia Mathematica* à des questions qui tiennent à l'analyse de la syntaxe logique et de la sémantique des théories mathématiques.

En d'autres termes, de la même manière dont il avait affronté l'opposition entre empirisme et rationalisme lorsqu'il avait écrit *La Construction logique du monde*, le but que s'était fixé Carnap (1939) en écrivant *Foundations of Logic and Mathematics* était – comme l'observe, encore une fois, Michael Friedman (2011) – de se servir des « méthodes caractéristiques de la logique » (« *distinctively logical methods* ») non pas tant afin de « résoudre » (« *resolve* ») les controverses entre logicistes, formalistes et intuitionnistes, qu'afin de les « dissoudre » (« *dissolve* »), ou, pour user d'une terminologie hégélienne, de « conserver » (« *aufbewahren* ») (Hegel 1816) dialectiquement¹⁶⁹ les aspects essentiels des différentes tendances opposées, en traduisant des querelles « métaphysiques » (« *metaphysical* ») et « métascientifique » (« *metascientific* ») (Friedman 2011, p. 259) en questions métalinguistiques, c'est-à-dire métasyntaxiques et métasémantiques. C'est ainsi que la conjonction du principe de tolérance syntaxique et du principe de tolérance sémantique a également donné à Carnap (1939) les moyens de résoudre le premier des deux problèmes que le formalisme avait légués au courant du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique – c'est-à-dire le problème de l'élaboration d'un formalisme qui s'applique à la totalité du corps des connaissances mathématiques et qui prenne la forme d'un langage-système permettant aux mathématiciens d'exploiter la puissance et la portée inférentielle des principes transfinis, tels que le principe mathématique de l'induction transfinie ou le principe logique du tiers exclu, tout en évitant de tomber dans des paradoxes – en montrant en quoi il était possible de justifier non seulement une conception analytique des mathématiques, mais également le programme hilbertien qui visait à les axiomatiser. Plus précisément, la conjonction de ces deux principes lui a permis d'affirmer que le programme hilbertien ne constituait rien d'autre qu'une manière particulière de construire des cadres linguistiques

¹⁶⁹ « L'immédiat [*das Unmittelbare*] est, suivant ce côté négatif, englouti dans l'Autre [*in dem Anderen untergegangen*], – toutefois, l'Autre, de façon essentielle, n'est pas le négatif vide, le néant [*wesentlich nicht das leere Negative, das Nichts*], qui est pris comme le résultat habituel de la dialectique, mais il est l'Autre du premier, le négatif de l'immédiat [*das Andere des Ersten, das Negative des Unmittelbaren*]; il est donc déterminé comme ce qui est médiatisé [*das Vermittelte*], – il contient de façon générale dans lui-même la détermination du premier [*die Bestimmung des Ersten*]. Le premier est, du coup, essentiellement aussi préservé et conservé dans l'Autre [*wesentlich auch im Anderen aufbewahrt und erhalten*]. – Maintenir ferme le positif dans son sens négatif [*Das Positive in seinem Negativen...festzuhalten*], le contenu de la présupposition dans le résultat, c'est là ce qu'il y a de plus important dans la connaissance rationnelle » (Hegel 1816 ; 2016, p. 310).

qui soient en mesure de s'adapter aux caractéristiques propres à telle ou telle théorie mathématique, et dont l'avantage principal, vis-à-vis des approches logicistes et intuitionnistes, consistait dans son efficacité technique. Le principe de tolérance syntaxique permet, en effet, de rendre compte des différents systèmes axiomatiques qui étaient censés constituer, justement, le volet formalisé des mathématiques reconstruites à l'instar du programme hilbertien en les considérant comme autant de formalismes qui avaient été choisis pour telle ou telle raison pragmatique. Le principe de tolérance sémantique permet, en revanche, d'accepter l'interprétation – qui était, néanmoins, pré-sémantique, car purement intuitive – que Hilbert (1922, 1926, 1928, 1931) et ses collaborateurs donnaient des signes mathématiques dont se constituaient ces mêmes systèmes – en tant que formes sensibles que nous pouvons reconnaître, de manière générale et avec certitude, indépendamment des conditions dans lesquelles elles se présentent à nous et sans aucune définition préalable de leur signification conceptuelle (Hilbert 1922) – tout en évitant, pour autant, de s'engager dans une défense de l'ontologie spécifique des objets mathématiques que comporte, précisément, une telle interprétation. Cela dit, est-ce que Carnap (1928, 1934, 1936b, 1937, 1939, 1945a, 1950b) envisageait les cadres linguistiques que l'on pourrait utiliser pour reconstruire rationnellement et formellement les théories des sciences formelles comme ayant les mêmes propriétés syntaxiques et sémantiques que celles que possèdent les cadres dont on pourrait se servir pour reconstruire les théories qui relèvent des sciences empiriques ? En d'autres termes, est-ce que l'intégration de l'axiomatisation telle que l'entendait Hilbert (1899, 1901, 1922, 1931) à la conception carnapienne de la science comme cadre linguistique, par l'intermédiaire des principes de tolérance syntaxique et de tolérance sémantique que nous venons d'analyser, justifiait le projet d'étendre cette même vision de l'axiomatisation à la reconstruction des théories physiques et, plus généralement, des théories qui relèvent des sciences empiriques ?

Afin de répondre à ces autres questions, il est utile d'analyser l'axiomatisation de la géométrie euclidienne qu'esquisse Carnap (1939), toujours dans *Foundations of Logic and Mathematics*, et que l'on peut considérer comme constituant, précisément, une explicitation de l'axiomatisation qu'en avait déjà proposée Hilbert (1899), en ceci qu'elle permet d'expliciter le lien qui existe entre cette dernière et la conception formaliste des mathématiques comme système axiomatique de formules non interprétées. La raison en est que Carnap (1939) construit son propre système d'axiomes de la géométrie comme consistant dans une forme particulière de « calcul géométrique » (« *geometrical calculus* ») – c'est-à-dire comme consistant dans un « système de règles formelles [*'formal rules'*] qui déterminent des propriétés d'énoncés et de relations entre énoncés, elles aussi de nature formelle [*'certain formal properties and relations of sentences'*], notamment dans le but d'en tirer des déductions formelles [*'especially for formal deduction'*] » (Carnap 1939, p. 17) – qui se compose de deux volets : un « calcul logique de base » (« *basic logical calculus* ») – qui n'est rien d'autre que la

conjonction du « calcul propositionnel » (« *sentential calculus* ») et d'une partie du « calcul fonctionnel » (« *functional calculus* »), tous les deux « normalement interprétés » (« *normally interpreted* »)¹⁷⁰ – et un « calcul spécifique » (« *specific calculus* »), non logique, qui ne contient pas d'autres règles d'inférence que celles qui caractérisent le calcul de base, mais seulement des axiomes supplémentaires, de nature spécifiquement géométrique (Carnap 1939, p. 51). Plus précisément, les axiomes d'un tel calcul comportent six signes primitifs, dont trois, « P_1 », « P_2 » et « P_3 », dénotent des classes d'individus, alors que les autres, « I », « B » et « K », dénotent des relations, si bien que la formule « $I(x, y)$ » signifie « il existe une relation (dyadique) I entre les individus x et y », « $B(x, y, z)$ » signifie « il existe une relation (triadique) B entre les individus x , y et z », etc. Voici, donc, les quelques exemples d'axiomes géométriques que fournit Carnap (1939) :

- G 1.* Pour tout x, y [si [x appartient à P_1 et y appartient à P_1] alors, pour quelques z donnés [z appartient à P_2 et $I(x, z)$ et $I(y, z)$]].
- G 2.* Pour tout x [si x appartient à P_3 alors, pour quelques y donnés [y appartient à P_1 et, il n'est pas vrai que $I(y, z)$]].
- G 3.* Pour tout x, y, z [si $B(x, y, z)$ alors, il n'est pas vrai que $B(y, x, z)$].
- G 4.* Pour tout x, y, z [si [x appartient à P_1 et y appartient à P_2 et z appartient à P_3 et $I(x, z)$ et $I(y, z)$ et il n'est pas vrai que $I(x, y)$] alors il existe un et un seul u tel que [u appartienne à P_2 et $I(x, u)$ et $I(u, z)$ et, pour tout t [si $I(t, u)$ alors, il n'est pas vrai que $I(t, y)$]]. (Axiome euclidien des parallèles).

(Carnap 1939, p. 52). Tout comme les axiomes de Hilbert (1899), ces énoncés fondamentaux expriment des relations formelles entre des termes dont la signification est, à priori, totalement indéterminée. La seule raison pour laquelle l'indétermination sémantique du système axiomatique est

¹⁷⁰ Par « calcul propositionnel » (« *sentential calculus* »), Carnap (1939) entend ici un calcul logique qui s'applique aux énoncés en tant que tels, considérés comme unités logiques de base, sans variables, ni quantificateurs. Quant au « calcul fonctionnel inférieur » (« *lower functional calculus* »), ou « calcul des prédicats du premier ordre », il contient « le calcul propositionnel [*'sentential calculus'*] et, en outre, des énoncés généraux qui contiennent des variables individuelles [*'general sentences with individual variables'*], notamment des énoncés universels [*'universal sentences'*] (interprétation : 'pour tout x, \dots ') et des énoncés existentiels [*'existential sentences'*] (interprétation : 'il y a au moins un x tel que...'). En logique symbolique [*'symbolic logic'*], ce calcul est également utilisé sans signes descriptifs [*'without descriptive signs'*] mais avec trois types de variables [*'with three kinds of variables'*] : les variables propositionnelles [*'sentential variables'*], les variables individuelles [*'individual variables'*] et les variables prédicatives [*'predicate variables.'*] » (Carnap 1939, p. 30). Le « calcul fonctionnel supérieur » (« *higher functional calculus* ») n'est, en revanche, rien d'autre que le calcul des prédicats d'ordre supérieur au premier.

plus évidente dans le cas du calcul géométrique de Carnap (1939) qu'elle ne l'est dans celui de l'axiomatisation hilbertienne de la géométrie consiste en ceci que Carnap (1939) a directement remplacé les notions primitives de Hilbert (1899) par des signes. Cela signifie que, si l'on traduit le signe « carnapien » « P_1 » par le terme « hilbertien » « (la classe des) point(s) », le signe « carnapien » « P_2 » par le terme « hilbertien » « (la classe des) droite(s) », « P_3 » par « (la classe des) plan(s) dans l'espace », « I » par « être sur » ou « être contenu dans », « B » par « entre » et « K » par « congruent », l'on retrouve précisément quelques-uns des énoncés qui constituent les axiomes du système de Hilbert (1899) :

GP 1. Tout couple de points est sur une droite.

GP 2. Pour tout plan dans l'espace, il existe un point qui n'est pas contenu dans ce plan.

GP 3. Si les points x , y et z sont sur une droite et x est entre y et z , alors y n'est pas entre x et z .

GP 4. Si le point x et la droite y sont contenus dans le plan z , mais x n'est pas sur y , alors il existe une et une seule droite u dans le plan z telle que x soit sur u et qu'aucun point ne soit à la fois sur u et sur y (c'est-à-dire telle qu' u soit parallèle à y en passant par x).

(Carnap 1939, p. 53). En outre, si l'on associe aux termes « hilbertiens » leurs significations intuitives, on peut fournir au calcul géométrique ce que Carnap (1939) appelait son « *interprétation habituelle* » (« *customary interpretation* »), c'est-à-dire l'interprétation « en fonction de laquelle le calcul a été construit » (« *for whose sake the calculus is constructed* ») (Carnap 1939, p. 58). Mais en quoi consiste, donc, une telle interprétation ?

Comme nous l'avons anticipé plus haut, interpréter un calcul logique, ou une théorie formalisée, signifie choisir un domaine d'objets qui puissent tenir lieu de référents pour les termes non logiques que contient ce même calcul, de telle sorte que l'on puisse également assigner une valeur de vérité aux énoncés qui sont formulés en associant ces mêmes termes conformément à un certain ensemble de règles syntaxiques. Dans le cas particulier de l'interprétation habituelle du calcul géométrique que Carnap (1939) esquisse dans *Foundations of Logic and Mathematics*, l'on peut considérer les termes « hilbertiens » que l'on a substitués aux signes précédemment introduits comme étant des « termes descriptifs » (« *descriptive terms* ») qui dénotent des concepts géométriques en tant que descriptions idéalisées d'objets physiques réellement existants : le terme « point » peut donc être compris comme dénotant « une place dans l'espace de la nature » (« *a place in the space of nature* ») (Carnap 1939, p. 52), le terme « droite » comme dénotant, par exemple, un rayon de lumière dans le vide, le terme

« congruence » (« *congruence* ») comme dénotant une certaine méthode de mesure des longueurs, etc. De cette manière, poursuit Carnap (1939) dans ce même ouvrage,

les axiomes et les théorèmes d'un calcul géométrique sont traduits en énoncés descriptifs et factuels [*descriptive, factual propositions*] de la physique interprétée : ils constituent une théorie que nous pourrions appeler *géométrie physique* [*physical geometry*], parce qu'il s'agit d'une branche de la physique, par opposition à la géométrie mathématique [*mathematical geometry*], c'est-à-dire [précisément] le calcul géométrique (Carnap 1939, p. 51-52).

Néanmoins, cette interprétation physique du calcul géométrique de Carnap (1939) – qui est, quant à lui, dépourvu de toute signification cognitive, qu'elle soit logique ou empirique – n'est pas la seule interprétation possible. En effet, un tel calcul se prête également à une « interprétation logique » (« *logical interpretation* »), qui consiste à remplacer les termes descriptifs « hilbertiens » par des termes logico-mathématiques. Pour ce faire, il suffit de traduire les énoncés de la géométrie physique dont parlait Carnap (1939) en énoncés de ce qu'on appelle la « géométrie analytique » (« *analytic geometry* »), ou « géométrie des coordonnées », au moyen des règles de traduction qui ont été « trouvées par Descartes » (« *found by Descartes* ») (Carnap 1939, p. 52). Autrement dit, il suffit de traduire le signe « carnapien » « P_1 » non pas par le terme « hilbertien » « point », mais par le terme logico-mathématique « triplet ordonné de nombres réels » (« *ordered triple of real numbers* »), le signe « carnapien » « P_2 » non pas par le terme « hilbertien » « droite », mais par le terme logico-mathématique « classe des triplets ordonnés de nombres réels qui sont racines d'une équation linéaire donnée » (« *class of ordered triples of real numbers fulfilling a linear equation* »), etc. C'est ainsi que, à partir des axiomes du calcul géométrique, l'on obtient non pas les axiomes de la physique géométrique, mais des énoncés qui sont « C-vrais » (« *C-true* ») dans un certain calcul mathématique, c'est-à-dire des énoncés que l'on peut démontrer en tant que théorèmes de la branche des mathématiques que formalise le calcul en question – comme, par exemple, l'arithmétique – sur la base des règles syntaxiques de transformation, et notamment des règles d'inférence, qui sont propres à ce même calcul (Carnap 1939, p. 52). C'est pourquoi Carnap (1939) pouvait en conclure qu'il n'existe aucune distinction fondamentale entre l'arithmétique et la géométrie en tant que calculs logiques ou quant à leurs « interprétations possibles » (« *possible interpretations* ») (Carnap 1939, p. 56), alors qu'il existe une différence essentielle quant à leurs interprétations habituelles : les énoncés de l'arithmétique dans son interprétation habituelle, c'est-à-dire en tant que « théorie des nombres » (« *theory of numbers* »), sont « L-vrais » (« *L-true* »), c'est-à-dire tautologiques et donc dépourvus de tout contenu objectif, alors que les énoncés de la géométrie dans son interprétation habituelle,

c'est-à-dire en tant que « théorie de l'espace physique » (« *theory of physical space* »), sont « descriptifs, factuels et empiriques » (« *descriptive, factual, and empirical* ») (Carnap 1939, p. 56).

Il en découle que la manière dont Carnap (1939) reformule l'axiomatisation de la géométrie qu'avait proposée Hilbert (1899) dans *Foundations of Logic and Mathematics*, c'est-à-dire en mettant en valeur le fait qu'elle préfigure une conception de la reconstruction formelle des théories mathématiques comme systèmes axiomatiques de formules non interprétées, nous permet d'en tirer une conclusion que William Demopoulos (2013b) a qualifiée de « thèse de Carnap » (« *Carnap's thesis* ») et qu'il a interprétée comme étant une conséquence directe des principes de tolérance que nous venons d'analyser. Plus précisément, d'après cette thèse, il existerait deux catégories de « théories mathématiques appliquées » (« *applied mathematical theories* ») (Demopoulos 2013b, p. 28). D'une part, il y aurait des théories mathématiques – telles l'arithmétique – qui seraient de nature analytique, tout en étant appliquées, et qui serviraient, par conséquent, de simples « outils de déduction ». D'autre part, il y aurait également des théories mathématiques auxquelles il faudrait attribuer un contenu factuel, afin de pouvoir les appliquer aux phénomènes physiques, et donc afin de pouvoir s'en servir pour effectuer des opérations logiques et computationnelles dans le domaine des sciences empiriques. Tel est, justement, le cas de la géométrie¹⁷¹. C'est pourquoi la manière dont

¹⁷¹ Plus précisément, dans sa tentative de « reconstruction bienveillante » (« *sympathetic reconstruction* ») (Demopoulos 2013b, p. 30) des arguments de Carnap (1939), William Demopoulos (2013b) oppose deux stratégies de justification. L'une est celle que proposent Goldfarb et Ricketts (1992), d'après laquelle la thèse de Carnap (1939) ne serait rien d'autre qu'une application des principes de tolérance syntaxique et de tolérance sémantique qui consisterait à stipuler, pour des raisons pragmatiques, que « la classe des énoncés analytiques devrait inclure l'ensemble de la logique et des mathématiques » (« *the class of analytic statements should include the whole of logic and mathematics* ») (Demopoulos 2013b, p. 33), à l'exception de la géométrie en tant que théorie de l'espace, car les concepts géométriques seraient inexorablement mêlés à des concepts physiques. L'autre est celle que défend Demopoulos (2013b) lui-même et qu'il qualifie de « stratégie einsteinienne » (« *Einsteinian strategy* ») (Demopoulos 2013b, p. 34). Cette stratégie vise à justifier la thèse de Carnap (1939) non pas exclusivement sur la base d'un argument pragmatique au sujet de la nécessité de définir la classe des énoncés analytiques, mais également sur la base d'un argument méthodologique qui porte sur la nature des opérations qu'il faut accomplir pour appliquer telle ou telle théorie mathématique. D'après Demopoulos (2013b), ce qui distinguerait les théories mathématiques appliquées de nature analytique des théories mathématiques appliquées de nature synthétique consisterait en ceci que, afin d'appliquer ces dernières aux phénomènes physiques, il serait nécessaire d'émettre des hypothèses, visant à contraindre les relations entre objets que définissent les systèmes axiomatiques en question, qui sont non seulement de nature formelle, mais également de nature empirique. Demopoulos (2013b) précise, ensuite, que les hypothèses empiriques qu'il faut adopter comme contraintes pour appliquer la géométrie aux phénomènes physiques portent sur l'identification d'un certain « critère d'identité » (« *criterion of identity* ») (Demopoulos 2013b, p. 42). Par conséquent, c'est en cela que les applications de la géométrie se distingueraient de celles de l'arithmétique, comme en témoigneraient, toujours d'après Demopoulos (2013b), les différences entre l'analyse de « l'application de la théorie des nombres naturels de Peano-Dedekind » (« *the application of the Peano-Dedekind theory of natural numbers* »)

Carnap (1939) a explicité les tenants et les aboutissants de l'axiomatisation hilbertienne de la géométrie nous permet de mettre en évidence non seulement les avantages d'une telle démarche axiomatique, mais également ses défauts. Son avantage principal consiste, notamment, en ceci qu'elle permet d'identifier et de classer, de manière claire et systématique, les relations logiques que les membres d'une certaine famille de concepts entretiennent les uns avec les autres – le cas échéant, les concepts fondamentaux de la géométrie, et notamment de la géométrie euclidienne. Son plus grand défaut consiste, en revanche, en ceci qu'elle soulève le problème de l'interprétation du système d'axiomes que l'on a choisi pour reconstruire telle ou telle théorie, comme en témoigne, justement, le fait que la formalisation *stricto sensu* de l'arithmétique et de la géométrie, effectuée à l'aune du programme hilbertien lui-même, ne permet pas de saisir les différences essentielles qui existent entre ces deux branches des mathématiques. Le fait que, parmi toutes les branches des mathématiques, la géométrie, en tant que théorie de l'espace, soit celle qui se rapproche le plus des sciences empiriques nous permet, en conséquence, d'en conclure que c'est précisément lorsqu'on s'attelle – comme le suggéra Hilbert (1901) lui-même lors de la conférence internationale de mathématiques qui se tint à Paris en 1900 – à étendre la méthode axiomatique aux sciences physiques que le problème de l'interprétation devient particulièrement pressant. En effet, comme nous l'avons déjà remarqué plus haut, si les théories mathématiques peuvent être analysées et développées sous la forme de systèmes

à « l'acte de compter » (« *counting* ») qu'a effectuée Frege (1884) et « les implications de l'analyse d'Einstein [(1921) au sujet des rapports entre géométrie et expérience] pour l'application de la géométrie de Minkowski » à la physique (« *the bearing of Einstein's analysis on the application of Minkowski geometry* ») (Demopoulos 2013b, p. 42). D'une part, Frege (1884) et Einstein (1921) auraient, en effet, adopté une seule et même démarche, qui aurait consisté à inverser les rôles de « *definiens* » et de « *definiendum* » dans le cadre de la définition de certaines « relations d'équivalence » (« *equivalence relations* ») par rapport à des séries ordinales données : tout comme Frege (1884) aurait expliqué « la notion ordinaire de nombre » (« *the ordinal notion of number* ») à partir de la relation d'« équinumérosité » (« *equinumerosity* ») entre deux concepts, ou classes d'objets, et non pas inversement, Einstein (1921) aurait rendu compte de la notion d'égalité des « *temps d'occurrence* » (« *times of occurrence* ») dans le « *continuum temporel* » (« *temporal continuum* ») de deux phénomènes, ou de deux ensembles de phénomènes, sur la base de la relation de « simultanéité » (« *simultaneity* ») entre les phénomènes en question, et non pas inversement (Demopoulos 2013b, p. 43). D'autre part, la définition même de la relation d'équinumérosité n'impliquerait aucune contrainte empirique, dans la mesure où elle dépendrait uniquement de « ces notions logiques qui sont nécessaires pour définir la relation de correspondance biunivoque » (« *those logical notions that are required for the definition of one-one correspondence* ») entre deux concepts, ou classes d'objets, alors que celle de la relation de simultanéité serait « empiriquement contrainte » (« *empirically constrained* ») par la nécessité de prendre en considération « des faits expérimentaux et nomologiques qui concernent la connectivité des signaux lumineux » (« *experimental and nomological facts regarding signal connectivity* ») (Demopoulos 2013b, p. 43). En conséquence, c'est précisément dans un tel sens qu'il faudrait interpréter, d'après Demopoulos (2013b), la thèse de Carnap (1939).

axiomatiques sans qu'il ne soit aucunement nécessaire de fournir une interprétation définitive aux axiomes et aux notions primitives que l'on utilise pour les reconstruire, toute axiomatisation d'une théorie physique doit être à même de restituer la signification empirique des concepts dont se constitue cette dernière, sous peine de la réduire à la théorie mathématique, ou à l'ensemble de théories mathématiques, dont on peut se servir pour décrire l'appareil formel qui lui est propre. C'est précisément cela que démontre, indirectement, la distinction entre « géométrie physique » (c'est-à-dire la géométrie telle qu'elle est reconstruite dans le système que constituent les axiomes GP1-GP4) et « géométrie mathématique » (c'est-à-dire la géométrie telle qu'elle est reconstruite dans le système que constituent les axiomes G1-G4) que dresse Carnap (1939) lui-même dans *Foundations of Logic and Mathematics*¹⁷². En d'autres termes, la manière dont Carnap (1939) a expliqué l'axiomatisation hilbertienne de la géométrie nous permet d'en conclure que, bien que l'extension d'une telle démarche axiomatique aux sciences empiriques puisse permettre de saisir la forme du système de concepts qui structure telle ou telle théorie, dans la mesure où, « par le simple fait que l'on pose des relations [formelles] bien déterminées [*definite links*] au moyen des axiomes », « un système d'axiomes non interprété » (« *uninterpreted axiom-system* ») possède toujours « une forme ou un ordre parfaitement

¹⁷² Une telle distinction est présentée de manière encore plus explicite dans un autre ouvrage de Carnap (1966), intitulé « *Les Fondements philosophiques de la physique* » (« *Philosophical Foundations of Physics* ») : « La géométrie mathématique relève des mathématiques pures [*Mathematical geometry is pure mathematics*]. En termes kantien, elle est à la fois analytique et *a priori* [*both analytic and a priori*]. Mais il n'est pas possible de dire qu'elle est également synthétique [*synthetic*]. Elle n'est en effet rien d'autre qu'un système déductif qui repose sur certains axiomes [*a deductive system based on certain axioms*], axiomes qui n'ont pas à recevoir d'interprétations par référence à un monde existant [*do not have to be interpreted by reference to any existing world*] ... En revanche, la géométrie physique traite de l'application de la géométrie pure au monde [*Physical geometry, on the other hand, is concerned with the application of pure geometry to the world*]. Ici les termes de la géométrie euclidienne gardent leur sens ordinaire [*their ordinary meaning*]. Un point est bien ce qui occupe une position réelle dans l'espace physique [*an actual position in physical space*] ... La confusion que le XIX^e siècle a commise en ce qui concerne la géométrie trouve là son origine principale. Du fait que le scientifique et le mathématicien pur utilisent les mêmes mots [*the same words*], on avait conclu à tort qu'ils pratiquaient le même genre de géométrie [*the same kind of geometry*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 177). Pour étayer son propos, Carnap (1966) cite directement une conférence tenue par Einstein (1921) en 1921 et consacrée, justement, aux relations entre « géométrie et expérience » (« *geometry and experience* »). Dans cette conférence, écrit Carnap (1966), Einstein (1921) « y parle de 'mathématiques', mais en se référant à la géométrie dans les deux sens où elle peut être comprise [*he meant geometry in the two ways that it can be understood*]. 'Dans la mesure où les théorèmes mathématiques s'appliquent au réel dit-il, ils ne sont pas certains' [*So far as the theorems of mathematics are about reality...they are not certain*]. Cela veut dire, transposé en termes kantien : pour autant qu'ils sont synthétiques, ils ne sont pas *a priori*. 'Et dans la mesure où ils sont certains, ils ne s'appliquent pas à la réalité' [*And so far as they are certain...they are not about reality*]. En termes kantien : pour autant qu'ils sont *a priori*, ils ne sont pas synthétiques » (Carnap 1966 ; 1973, p. 179).

déterminé » (« *a perfectly definite form or order* »), il n'en demeure pas moins vrai qu'une telle forme sera toujours « entièrement dépourvue de sens [*'meaningless'*] en ceci qu'il ne dira rien au sujet de la référence objective [*'objective reference'*] de n'importe quelle branche des sciences naturelles » (Woodger 1937, p. 5). C'est pourquoi reconstruire formellement la structure des théories qui relèvent des sciences empiriques sous la forme de systèmes axiomatiques signifie trouver, au préalable, une solution au problème de leur interprétation et c'est précisément en cela que consiste le lien logique qui existe entre le volet syntaxique de la conception classique des théories scientifiques et son volet sémantique. Mais quelle est donc la réponse que les architectes de la conception classique des théories scientifiques, et notamment Rudolf Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) ont apportée à ce problème ?

2.3.2 Qu'est-ce que cela signifie que de comprendre une théorie scientifique ? Le volet sémantique de la conception classique des théories scientifiques comme théorie de l'interprétation partielle des calculs physiques

Afin de répondre à une telle question, il est utile d'analyser la manière dont, dans le dernier chapitre de *Foundations of Logic and Mathematics*, Carnap (1939) affronte la question de la « compréhension » (« *understanding* ») des termes du langage de la physique. Ce problème, observé, s'est posé suite aux développements qu'avait connus la physique théorique au cours des premières décennies du XX^e siècle et qui avait abouti, comme nous l'avons vu plus haut, à ce que Carnap (1939) lui-même considérait comme étant « cette méthode de construction, de mise à l'épreuve et d'application des théories physiques que nous appelons *formalisation*, c'est-à-dire la construction d'un calcul complété par une interprétation » (« *that method in the construction, testing, and application of physical theories which we call formalization, i.e., the construction of a calculus supplemented by an interpretation* ») (Carnap 1939, p. 67). C'est précisément une telle interprétation qui permet de comprendre les formules dont se compose le volet formalisé de telle ou telle théorie. Mais que veut dire, justement, comprendre une formule, par exemple une équation, du langage formel de la physique ? De premier abord, l'on pourrait considérer que comprendre une formule telle que, par exemple, l'une des équations fondamentales de l'électromagnétisme de Maxwell¹⁷³ signifie en donner une représentation intuitive, le cas échéant par l'intermédiaire d'un « modèle » (« *model* »)

¹⁷³ Plus précisément, les équations de Maxwell sont les suivantes : (1) la loi de Gauss, $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$; (2) la deuxième équation de Maxwell, $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$; (3) la loi de Faraday, $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$; (4) la loi d'Ampère, $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (Griffiths 1999, p. 326).

(Carnap 1939, p. 67) tel que ceux que Carl G. Hempel (1965) appelait « mécaniques » (« *mechanical* ») ou, plus généralement, « analogiques » (« *analogical* ») (Hempel 1965, p. 435). Plus précisément, construire un modèle de ce type revient à identifier un phénomène qui soit intuitivement compréhensible, c'est-à-dire dont on puisse donner une représentation qui se rapproche le plus possible de notre expérience quotidienne, et que l'on puisse mettre en relation avec le phénomène que l'on souhaite interpréter au moyen d'une certaine relation d'analogie, que Hempel (1965) lui-même qualifiait d'« *isomorphisme nomique* » (« *nomic isomorphism* »). Tel que le définissait ce dernier, un isomorphisme nomique entre deux phénomènes donnés consiste, en effet, dans « un *isomorphisme syntaxique* » (« *syntactic isomorphism* ») entre un ensemble de lois qui permet de rendre compte du premier et un ensemble de lois qui permet d'expliquer le second, où, par « isomorphisme syntaxique », l'on entend ici une correspondance entre la structure logique d'un certain énoncé de loi et la structure d'un autre énoncé de loi qui est telle que, si l'on remplaçait tous les termes descriptifs qui figurent dans le premier par ceux qui figurent dans le second, on finirait par transformer celui-là en celui-ci, et inversement (Hempel 1965, p. 435-436). C'est en procédant ainsi qu'il est donc possible d'interpréter un phénomène microscopique – comme, par exemple, « l'écoulement d'un courant électrique le long d'un fil conducteur » (« *the flow of an electric current in a wire* ») –, en y associant un phénomène macroscopique, intuitivement mieux compréhensible, qui tient lieu de modèle analogique du premier – comme, toujours dans le cas de l'écoulement d'un courant électrique, « l'écoulement d'un fluide dans un tuyau » (« *the flow of a fluid in a pipe* ») (Hempel 1965, p. 435) –, pourvu qu'il existe une relation d'isomorphisme syntaxique entre les lois qui permettent d'expliquer, respectivement, ces deux phénomènes¹⁷⁴. Mais est-ce que cela signifie

¹⁷⁴ Comme le rappelle Hempel (1965) lui-même, dans le cas de l'analogie entre l'écoulement d'un fluide (macroscopique) et l'écoulement d'un courant électrique (microscopique), il est effectivement possible d'établir une relation d'isomorphisme syntaxique entre une loi qui décrit, justement, l'écoulement, à vitesse modérée, d'un fluide dans un tuyau étroit, à section circulaire, et une loi qui décrit l'écoulement d'un courant électrique dans un fil conducteur métallique, c'est-à-dire, respectivement, la « loi de Poiseuille » (« *Poiseuille's law* ») et la « loi d'Ohm » (« *Ohm's law* ») (Hempel 1965, p. 435). La loi de Poiseuille affirme, en effet, que

$$V = c \cdot (p_1 - p_2), \text{ avec } c = \frac{c'}{l_1}$$

où V est la quantité de volume de fluide qui est en train de s'écouler à travers une section fixe du tuyau à chaque second, $(p_1 - p_2)$ est la différence de pression entre les deux extrémités du tuyau, l_1 est la longueur du tuyau même, alors que c et c' sont deux constantes de proportionnalité. La loi d'Ohm affirme, en revanche que

$$I = k \cdot (v_1 - v_2), \text{ avec } k = \frac{k'}{l_2}$$

que, afin de comprendre la signification du symbole « E » qui apparaît dans les équations de Maxwell, il serait nécessaire d'identifier un modèle analogique, ou plusieurs modèles analogiques, de ces mêmes équations ? Autrement dit, est-ce que comprendre une théorie qui a été reconstruite sous la forme d'un calcul logique signifie identifier un modèle qui permette d'interpréter, par analogie, tous les termes abstraits qui y figurent ?

La réponse que Carnap (1939) apporte à cette question, toujours dans *Foundations of Logic and Mathematics*, est résolument négative, en ceci qu'une telle manière d'interpréter les équations de Maxwell ne correspondrait pas, à son avis, à la pratique concrète des physiciens. Lorsque nous demandons à un physicien de nous expliquer la signification du symbole « E », écrit Carnap (1939), ce dernier aura beau nous répondre qu'un tel symbole désigne le champ (vectoriel) électrique, mais, par ce biais, il ne fera pas autre chose que de nous fournir une règle sémantique (implicite) permettant d'établir une correspondance entre « un symbole d'un calcul symbolique » (« *a symbol in a symbolic calculus* ») et « une expression verbale dans un calcul verbal » (« *a corresponding word expression in a calculus of words* ») (Carnap 1939, p. 68). « Nous sommes dans notre bon droit », poursuit-il,

d'exiger une interprétation [*'demanding an interpretation'*] pour ' E ', mais celle-ci ne nous sera donnée qu'indirectement, par l'intermédiaire de règles sémantiques qui font référence à des signes élémentaires [*'indirectly by semantical rules referring to elementary signs'*] et des formules qui relient ces mêmes signes à ' E '. Une telle

où I est la quantité de charge électrique qui est en train de s'écouler à travers une section fixe du fil à chaque second, $(v_1 - v_2)$ est la différence de potentiel électrique entre les deux extrémités du fil, l_2 est la longueur du fil même, alors que k et k' sont, encore une fois, deux constantes de proportionnalité (Hempel 1965, p. 435). Il est donc aisé de remarquer que ces deux lois partagent la même structure syntaxique, que l'on pourrait formaliser de la manière suivante :

$$v_{\text{écoulement}} = \frac{\text{const}}{\text{longueur}_{\text{parcours}}} \cdot (\Delta \text{ fonction d'état})$$

où « $v_{\text{écoulement}}$ » représente une vitesse d'écoulement, qu'il s'agisse de celle d'un volume fluide ou de celle des charges dont se compose un courant électrique donné, « const » désigne une constante de proportionnalité, qu'il s'agisse de c' ou de k' , « $\text{longueur}_{\text{parcours}}$ » représente la distance qui est parcourue, encore une fois, par un volume de fluide ou par les charges dont se compose un courant électrique donné et « $\Delta \text{ fonction d'état}$ » dénote la différence entre deux valeurs, pour ainsi dire, « extrêmes » d'une fonction d'état qui décrit, précisément, l'état d'équilibre du système physique en question, soit qu'il s'agisse d'un fluide qui s'écoule dans un tuyau (et, le cas échéant, la fonction en question sera la pression aux deux extrémités du tuyau), soit qu'il s'agisse d'un courant électrique qui s'écoule dans un fil conducteur (et, le cas échéant, la fonction en question sera le potentiel électrique aux deux extrémités du fil conducteur).

interprétation nous permet d'utiliser les lois qui contiennent 'E' dans le but d'en déduire des prédictions [*for the derivation of predictions*]. C'est ainsi que nous pouvons comprendre 'E', dans la mesure où 'comprendre' une expression, un énoncé, ou une théorie signifie être à même de l'utiliser pour décrire des faits connus ou pour prédire de nouveaux faits [*the 'understanding' of an expression, a sentence, or a theory means capability of its use for the description of known facts or the prediction of new facts*]. Une 'compréhension intuitive' ou une traduction directe de 'E' en des termes qui font référence à des propriétés observables [*terms referring to observable properties*] n'est ni nécessaire, ni possible (Carnap 1939, p. 68-69).

Autrement dit, d'après les mots mêmes de Carnap (1939), la compréhension de la signification empirique d'une théorie physique ne consiste, par conséquent, pas dans la compréhension intuitive de la signification de chaque élément linguistique de la théorie, ainsi que de la manière dont les relations entre ces mêmes éléments décrivent la structure qui régit les relations entre les phénomènes étudiés. Elle consiste plutôt dans la compréhension des relations formelles que chaque signe du calcul logique qui est supposé reconstruire la théorie en question entretient avec les autres signes qui y figurent, ainsi que de la manière dont ces mêmes relations formelles sont mises en corrélation indirecte avec des relations entre phénomènes, car c'est précisément une telle corrélation indirecte qui permet de fournir une interprétation empirique au calcul dans son ensemble. Nous pouvons donc en conclure que le but de Carnap (1939) consiste ici, encore une fois, à dissoudre un problème ontologico-épistémologique en le réduisant à un problème métasyntaxique et métasémantique. Comprendre une théorie donnée par le biais d'une interprétation intuitive des termes les plus abstraits qui y figurent – c'est-à-dire par le biais d'un modèle analogique, voire d'une classe de modèles analogiques – signifie, en effet, accepter deux présupposés fondamentaux, qui sont, justement, l'un de nature ontologique et l'autre de nature épistémologique. D'un point de vue ontologique, il est nécessaire d'identifier, du moins à grands traits, le processus physique, ou la classe de processus physiques, que décrit tel ou tel terme abstrait, éventuellement en relation avec d'autres termes de même nature, ainsi qu'un autre processus physique, ou une autre classe de processus physiques, qui semble présenter des analogies avec le premier, ou la première, mais qui se rapproche davantage de notre expérience quotidienne. D'un point de vue épistémologique, il est nécessaire d'établir un isomorphisme syntaxique, au sens de Hempel (1965), entre les lois qui permettent d'expliquer le premier phénomène, ou la première classe de phénomènes, et celles qui permettent de rendre compte de l'autre. Autrement dit, il est nécessaire de s'assurer du fait que les ressemblances que l'on a pu observer entre les phénomènes en question ne soient pas de nature tout simplement superficielle et apparente, mais qu'elles tiennent à de raisons épistémologiques plus fortes. Comprendre une théorie

scientifique en tant que calcul logique interprété signifie, en revanche, apprendre à manier les règles qui constituent la structure logico-syntaxique de ce même calcul, ainsi que les règles sémantiques qui permettent, justement, d'interpréter les signes dénotant les termes abstraits qui figurent dans la théorie en question. Il en découle, en conséquence, que la manière dont Carnap (1939) concevait l'interprétation des calculs physiques, et plus généralement des calculs logiques qui sont censés représenter des théories empiriques, relevait également d'une conception de la reconstruction formelle du savoir scientifique (ainsi que de l'activité scientifique elle-même) comme construction de cadres linguistiques, et donc d'une conception de la philosophie, en tant que théorie de la connaissance, comme cadre métathéorique permettant d'effectuer précisément une telle construction.

En outre, nous pouvons également en conclure que, tout comme le but de Carnap (1928, 1939, 1961b), dans *La Construction logique du monde* et dans les paragraphes précédents de *Foundations of Logic and Mathematics*, est de dissoudre, pour ainsi dire, « dialectiquement », l'opposition métaphysique et métascientifique entre rationalistes et empiristes classiques, d'une part, ainsi qu'entre logicistes, formalistes et intuitionnistes, d'autre part, l'objectif qu'il vise lorsqu'il affronte la question de la compréhension des théories physiques consiste à dissoudre, toujours dialectiquement, l'opposition métaphysique et métascientifique entre deux conceptions des théories scientifiques, c'est-à-dire une conception instrumentaliste et une conception réaliste, ou descriptiviste. En effet, comme l'explique Carnap (1966) lui-même dans un ouvrage postérieur, c'est-à-dire *Les Fondements philosophiques de la physique*, d'après « la conception 'instrumentaliste' des théories » (« *the 'instrumentalist' view of theories* ») – que Carnap (1966) rapprochait de la conception « pragmatiste » (« *pragmatist* ») de Charles Peirce et John Dewey –, « les théories ne se rapportent pas à 'la réalité' [*theories are not about 'reality'*]. Elles ne sont que des outils linguistiques [*language tools*] au moyen desquels les phénomènes observables de l'expérience sont ordonnés dans quelque modèle qui sera efficace pour prédire de nouveaux observables [*some sort of pattern that will function efficiently in predicting new observables*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 247). D'un tel point de vue, « les termes théoriques sont des symboles commodes [*convenient symbols*] et les postulats qui les contiennent sont adoptés en vertu de leur utilité et non de leur 'vérité' [*because they are useful, not because they are 'true'*] ; ils n'ont aucun 'surplus de sens' [*no surplus meaning*] au-delà de leur mode de fonctionnement à l'intérieur du système [*the way in which they function in the system*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 247). Quant à « la conception dite 'descriptive' ou 'réaliste' des théories » [*the 'descriptive' or 'realist' view of theories*], toujours telle que la présente Carnap (1966) dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, elle consiste à concevoir les termes abstraits, tels que les termes « électron » et « champ magnétique », comme des termes qui font

référence à des « entités réelles que la science cherche inlassablement à mieux connaître » (« *actual entities about which science is steadily learning more* »), d'autant plus que

il n'y a pas de ligne de partage bien nette [*'no sharp line'*] entre un observable [*'an observable'*] (tel qu'une pomme) et un non observable [*'an unobservable'*] (tel qu'un électron). Une amibe n'est pas observable à l'œil nu, mais elle l'est à travers un microscope ordinaire... Un proton est inaccessible à ce genre d'observation directe, mais sa trace dans une chambre à bulles peut être observée. Si on a le droit de dire que l'amibe est 'réelle' [*'real'*], alors on doit pouvoir dire que le proton est également réel (Carnap 1966 ; 1973, p. 247-248).

Autrement dit, les réalistes s'appuient sur l'ambiguïté de la distinction que l'on peut dresser entre les termes qui dénotent des phénomènes directement observables et des termes plus abstraits pour avancer qu'une telle distinction ne devrait pas nous empêcher de reconnaître l'existence de structures qui sous-tendent ces mêmes phénomènes et qui nous permettent de les expliquer¹⁷⁵. Pour reprendre les mots d'un autre auteur, auquel Carnap (1966) fait lui-même référence dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, c'est-à-dire Ernest Nagel (1961), la différence fondamentale entre les réalistes et les instrumentalistes se résume, par conséquent, au fait que les premiers considèrent que la question qu'il faut se poser pour comprendre et pour évaluer les théories scientifiques est celle de savoir « si elles sont vraies ou fausses » (« *whether they are true or false* ») au sujet des entités que semblent dénoter leurs termes abstraits, alors que les seconds estiment que la question qu'il est nécessaire de se poser est celle de savoir « si elles constituent des moyens techniques efficaces pour se représenter et pour déduire des phénomènes expérimentaux » (« *whether they are effective techniques for representing and inferring experimental phenomena* ») (Nagel 1961, p. 133). Mais en quoi consiste, par conséquent, la manière dont Carnap (1939, 1966) visait à dépasser une telle opposition ?

¹⁷⁵ Plus récemment, Stathis Psillos (1999) a défini le « réalisme scientifique » (« *scientific realism* »), du moins en ce qui concerne la structure et la signification des théories, comme consistant en trois thèses distinctes, à savoir une thèse métaphysique (« le monde possède une structure d'espèces naturelles [*'natural-kind structure'*] qui est bien définie et indépendante de l'esprit humain [*'definite and mind independent'*] »), une thèse sémantique (les théories scientifiques constituent des « descriptions vériconditionnelles [*'truth-conditional description'*] du domaine qu'elles visent, qu'il soit observable [*'observable'*] ou non observable [*'unobservable'*] ») et une thèse épistémique (« des théories scientifiques matures et précises dans leurs prédictions [*'mature and predictively successful scientific theories'*] » peuvent être considérées comme étant « bien corroborées et approximativement vraies du monde [*'well-confirmed and approximately true of the world'*] ») (Psillos 1999, p. xvii).

Dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, Carnap (1966) suggère, encore une fois, que les différences entre les deux approches philosophiques qu’il est en train d’analyser se réduisent à des questions qui sont « essentiellement d’ordre linguistique » (« *essentially linguistic* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 248), c’est-à-dire à des questions qui tiennent à l’opportunité (pragmatique) d’utiliser telle ou telle façon de parler en vue du but visé, qui, dans ce cas spécifique, n’est rien d’autre que le progrès de la science. Autrement dit, la véritable question à laquelle les instrumentalistes et les réalistes apportent des réponses différentes est, toujours selon Carnap (1966), la question de savoir si le fait de parler d’entités abstraites telles que les électrons ou les champs magnétiques comme s’il s’agissait d’entités véritablement existantes permet aux physiciens, ou aux scientifiques plus en général, d’utiliser plus efficacement les théories dont ils disposent, et à en formuler de nouvelles, dans le but de décrire les phénomènes observés, ou de prédire de futurs phénomènes, d’une manière qui soit de plus en plus sûre et précise. Sur ce point, Carnap (1966) renvoie encore une fois à Nagel (1961), qui était parvenu, après avoir effectué une analyse sémantique des différents critères en vertu desquels l’on peut affirmer l’existence effective des entités qui semblent être dénotées par le vocabulaire d’une théorie donnée¹⁷⁶, à la conclusion que le réalisme et l’instrumentalisme ne seraient, justement, rien

¹⁷⁶ Plus précisément, Nagel (1961) analyse cinq critères de réalité effective. D’après le premier critère, afin que l’on puisse considérer une chose ou un événement comme étant réel, il faut que « la chose ou l’événement en question soit publiquement perceptible lorsque les conditions qui sont propices à son observation sont réalisées » (« *the thing or event be publicly perceived when suitable conditions for its observation are realized* ») (Nagel 1961, p. 146). D’après le deuxième, que Nagel (1961) considère comme étant presque totalement alternatif au premier, « tous les termes non logiques [*nonlogical*] d’une loi que l’on a formulée en tant qu’hypothèse [*an assumed law*] (qu’il s’agisse d’une loi expérimentale ou d’une loi théorique) désignent des choses qui sont physiquement réelles, pourvu que la loi en question soit bien corroborée par des preuves empiriques [*well supported by empirical evidence*] et qu’elle soit généralement acceptée par la communauté scientifique comme étant probablement vraie [*as likely to be true*] » (Nagel 1961, p. 147). D’après le troisième, il est possible de considérer un terme donné comme désignant une entité réellement existante si le terme en question figure dans « plusieurs lois expérimentales » (« *more than one experimental laws* »), pourvu que les lois en questions soient « logiquement indépendantes les unes des autres » (« *logically independent of each other* ») et logiquement « uniques », c’est-à-dire pourvu qu’« aucune d’entre elles ne soit logiquement équivalente à un ensemble de deux ou de plusieurs lois » (« *none of them is logically equivalent to a set of two or more laws* ») (Nagel 1961, p. 147). D’après le quatrième critère, « un terme dénote une entité qui est physiquement réelle si le terme apparaît dans une ‘loi causale’ bien établie [*a well-established ‘causal law*] » (qu’il s’agisse d’une loi théorique ou expérimentale), dans un certain sens du terme ‘causal’ qu’il faut préciser [*in some indicated sense of ‘causal’*] » (Nagel 1961, p. 149). Un exemple de loi causal nous est fourni par les lois de la mécanique qui permettent de décrire, de manière déterministe, l’évolution de l’« état d’un système physique » (« *state of a physical system* »), c’est-à-dire qui nous permettent d’affirmer que la « description de l’état » (« *state-description* ») d’un système donné – par exemple, un système de particules – à l’instant t , « A_t », est toujours suivie (ou précédée) par la description de l’état de ce même système à l’instant suivant (ou précédent) t' , « $A_{t'}$ », (Nagel 1961, p. 149). Par conséquent, si l’on adopte ce quatrième critère de réalité effective, les

d'autre que deux « façons de parler » (« *modes of speech* ») (Nagel 1961, p. 152). Cela implique, par conséquent, qu'il serait toujours possible, à l'issue d'une négociation linguistique, d'effectuer un choix entre les deux, si bien qu'elles ne constitueraient pas deux conceptions incompatibles de la nature des théories scientifiques, du moins dans la mesure où l'on éviterait de les charger de présupposés, encore une fois, métascientifiques et métaphysiques. Nous pouvons donc en conclure qu'il existe un parallèle étroit entre la manière dont Carnap (1939) envisageait l'axiomatisation et la formalisation des théories logico-mathématiques et la manière dont il envisageait l'axiomatisation et la formalisation des théories empiriques (Carnap 1939, 1966), qui tient essentiellement au rôle analogue que jouent les principes de tolérance syntaxique et de tolérance sémantique dans ces deux contextes. Il est, en effet, possible de considérer de tels principes comme constituant des piliers fondamentaux de la conception classique des théories scientifiques, telle que la présentait Carnap (1939, 1966) précisément dans ses analyses de la reconstruction des théories physiques sous la forme de calculs logiques dont la partie la plus abstraite serait, à priori, dépourvue de toute signification cognitive. En ce qui concerne le principe de tolérance syntaxique, ce dernier peut être considéré comme constituant une justification théorique de ce que nous avons qualifié plus haut de « présupposé

entités abstraites que l'on peut considérer comme étant physiquement réelles sont celles que dénotent les termes qui figurent dans les descriptions des états successifs du système physique en question. D'après le cinquième critère, en revanche, les entités théoriques physiquement réelles sont celles qui sont « invariantes par rapport à un certain ensemble de transformations, de changements, de projections ou de perspectives » (« *invariant under some stipulated set of transformations, changes, projections, or perspectives* ») (Nagel 1961, p. 149), comme, par exemple, la vitesse de la lumière, qui est dénotée, dans le cadre de la théorie unifiée de l'électromagnétisme ou dans celui de la théorie de la relativité, par la constante descriptive « λ », puisqu'il s'agit d'une grandeur physique qui est invariante par rapport aux différents référentiels que l'on pourrait choisir. Après avoir présenté cette liste (non exhaustive) des différents sens que l'on peut attribuer, sous la forme de critères de réalité, à l'expression « être physiquement, ou effectivement, réel », Nagel (1961) en conclut, ainsi, qu'il existe au moins un sens d'une telle expression dans lequel des entités qui sont dénotées par des termes abstraits peuvent être considérées comme étant effectivement réelles même d'un point de vue instrumentaliste. C'est le cas, par exemple, des atomes, pourvu que l'on accepte le troisième critère de réalité de Nagel (1961), car, d'un tel point de vue, affirmer que les atomes sont des entités réellement existantes signifie tout simplement « affirmer qu'il existe un certain nombre de lois expérimentales bien établies qui sont reliées les unes aux autres, ainsi qu'à d'autres lois, par l'intermédiaire d'une certaine théorie atomique » (« *to assert that there are a number of well-established experimental laws related in a certain manner to one another and to other laws by way of a given atomic theory* ») (Nagel 1961, p. 151), ce qui est fondamentalement compatible avec une conception instrumentaliste des théories scientifiques (et notamment des théories atomiques) comme simples outils visant à unifier des lois expérimentales déjà existantes en un système, ainsi qu'à en déduire de nouvelles. C'est précisément pour de telles raisons que Nagel (1961) pouvait donc affirmer que le réalisme et l'instrumentalisme, lorsqu'on les analyse d'un point de vue logico-linguistique, apparaissent comme étant de simples façons de parler, et non pas des conceptions métaphysiques et métascientifiques essentiellement opposées.

de la restructurabilité formelle des théories scientifiques ». Autrement dit, la possibilité de reformuler une théorie donnée dans un formalisme autre que celui dans lequel elle a originellement été conçue découle du présupposé qu'il n'existerait pas de relation biunivoque entre la théorie en question et tel ou tel système syntaxique. C'est précisément pour une telle raison que l'on peut regarder ce premier principe de tolérance comme étant l'une des conditions de possibilité de la conception classique des théories scientifiques. Quant au principe de tolérance sémantique, on peut le considérer comme constituant, lui aussi, l'une des conditions de possibilité de la conception classique des théories scientifiques, en ceci qu'il permet d'introduire, dans le cadre linguistique que l'on a choisi pour reconstruire telle ou telle théorie, les concepts abstraits qui en constituent le volet proprement théorique. Plus précisément, il permet d'introduire et de définir ces mêmes concepts sans qu'il soit nécessaire de trancher l'alternative entre réalisme et nominalisme, c'est-à-dire sans qu'il soit nécessaire de présupposer, respectivement, que les concepts en question fassent référence à des entités abstraites, mais réellement existantes, ou bien qu'il s'agisse de simples outils linguistiques dont le but ultime serait de servir de support à l'observation empirique et à des manipulations expérimentales. Nous pouvons donc en conclure que c'est précisément cet autre principe de tolérance qui nous permet de distinguer la partie purement conventionnelle des théories scientifiques, c'est-à-dire le système que constituent les termes abstraits qui y figurent, de leur partie empirique, c'est-à-dire du système que constituent les termes élémentaires qui y apparaissent, de même qu'il nous permet de concevoir le corps des mathématiques non pas comme un système d'informations, mais comme un outil pour effectuer des déductions dans les sciences empiriques. Autrement dit, c'est le principe de tolérance sémantique qui constitue le trait d'union entre les deux synthèses sur lesquelles repose la conception classique des théories scientifiques. En tant que tel, il nous permet ainsi d'envisager les théories empiriques comme étant des calculs logiques dont les termes abstraits sont, à priori, dépourvus de toute signification cognitive, et nécessitent, par conséquent, d'être interprétés « de manière indirecte » (« *indirectly* »), c'est-à-dire « par l'intermédiaire des formules du calcul qui les mettent en relation avec les termes élémentaires, qu'il s'agisse de définitions ou de lois » (« *by the formulas of the calculus, either definitions or laws, connecting them with the elementary terms* ») (Carnap 1939, p. 68). Mais qu'entendait concrètement Carnap (1939, 1966) par « interprétation indirecte et incomplète », et donc par « interprétation partielle », des termes abstraits qui apparaissent dans les théories scientifiques en fonction des termes élémentaires ?

Afin de répondre à une telle question, il est utile de prendre en considération la manière dont deux autres tenants de l'empirisme logique, à savoir Hempel (1952) et Feigl (1970), ont caractérisé la représentation des théories scientifiques en tant que calculs logiques partiellement interprétés que

l'on peut inférer de la conception classique des théories scientifiques. Le premier affirmait, par exemple, ce qui suit :

Une théorie scientifique peut donc être comparée à un réseau spatial complexe [*'a complex spatial network'*] : ses termes sont représentés par les nœuds [*'knots'*] du réseau, tandis que les fils qui relient ces derniers [*'the threads connecting the latter'*] correspondent en partie aux définitions [*'definitions'*], en partie aux hypothèses primitives ou dérivées [*'fundamental and derivative hypotheses'*] que renferme la théorie. Le système tout entier flotte [*'floats'*], pour ainsi dire, au-dessus du plan d'observation [*'above the plane of observation'*] où il se trouve ancré au moyen des règles d'interprétation [*'by rules of interpretation'*]. On peut comparer ces règles à des chaînes [*'strings'*] qui n'appartiennent pas au réseau mais en relient certaines parties à des régions déterminées du plan d'observation. Grâce à ces relations qui servent à l'interpréter [*'interpretive connections'*], le réseau peut remplir sa fonction de théorie scientifique [*'function as a scientific theory'*] : étant donné certains faits d'observation [*'observational data'*], nous pouvons remonter, par l'intermédiaire d'une chaîne d'interprétation [*'via an interpretive string'*], à un point précis du réseau théorique [*'point in the theoretical network'*] et, de là, par l'intermédiaire des définitions et des hypothèses, nous diriger vers d'autres points, d'où une nouvelle chaîne d'interprétation nous permettra de regagner le plan d'observation [*'a descent to the plane of observation'*] (Hempel 1952, cité par Carnap 1966 ; 1973, p. 258).

Une telle description de la structure d'une théorie donnée, lorsqu'elle est reconstruite sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques, correspond, justement, à celle qu'en donne Feigl (1970) dans son article sur la conception « orthodoxe » des théories scientifiques et que l'on peut voir à la figure (2). Telle que la présente Feigl (1970), cette structure consiste, en effet, dans un réseau de « concepts théoriques fondamentaux » (« *basic theoretical concepts* »), qui ne sont rien d'autre que les concepts primitifs (« *primitive concepts* ») que définissent, de manière implicite, les axiomes du calcul associé à la théorie en question (Feigl 1970, p. 5). Ces concepts, qui sont représentés, dans le diagramme, au moyen de ronds (○), sont liés à d'autres termes descriptifs qui apparaissent dans les énoncés de ce même calcul, et qui représentent des « concepts déduits » (« *derived concepts* ») ou « définis » (« *defined concepts* »), c'est-à-dire des concepts théoriques qui sont définis explicitement en termes de concepts primitifs, et notamment par déduction à partir de ces derniers. Les concepts déduits, visualisés par des triangles (△), et quelques-uns des concepts primitifs sont mis en relation, par le biais des règles de correspondance – ou de coordination – que représentent les lignes en

pointillé, avec les termes descriptifs du langage dans lequel est formulé le calcul associé à la théorie en question qui dénotent des « concepts empiriques » (« *empirical concepts* ») (□), c'est-à-dire avec des termes qui dénotent des grandeurs que l'on peut mesurer de manière relativement simple et directe, telles que, dans le cas d'une théorie physique, la masse (« *mass* »), la température (« *temperature* ») et l'intensité de lumière (« *light intensity* ») (Feigl 1970, p. 6). De tels concepts, précise Feigl (1970) dans son article, « sont définis 'de manière opérationnelle', c'est-à-dire en précisant les règles d'observation, de mesure, d'expérimentation ou d'analyse statistique qui en déterminent et en délimitent le domaine d'applicabilité, ainsi que les modalités d'application » (« *'operationally defined', i.e., by a specification of the rules of observation, measurement, experimentation, or statistical design which determine and delimit their applicability and application* ») (Feigl 1970, p. 6). Ce sont justement de telles

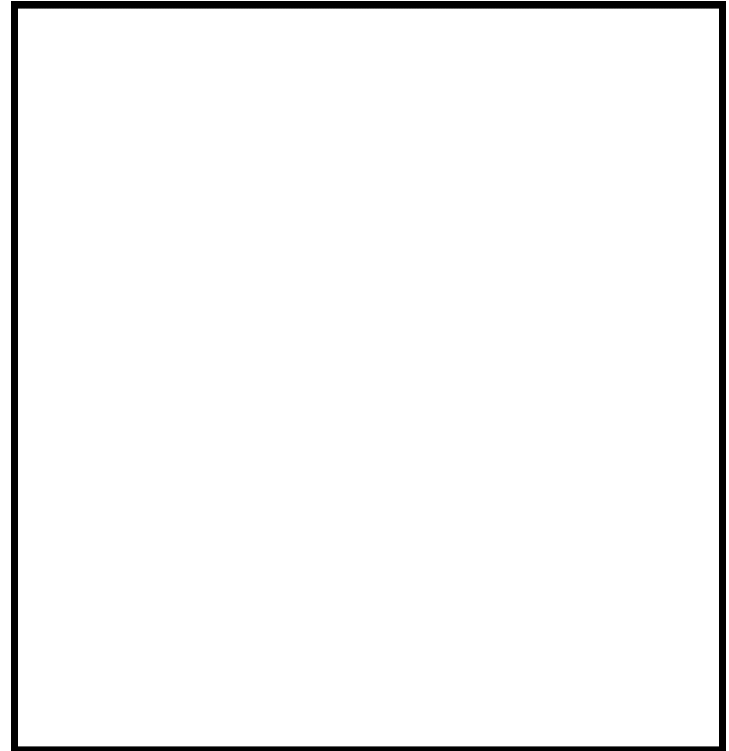


Figure 2 : Diagramme qui représente l'image de la structure des théories scientifiques que présuppose la conception classique (Feigl 1970, p. 6)

« définitions opérationnelles » (« *operational definitions* ») qui relient les concepts empiriques au soubassement observationnel de la théorie – c'est-à-dire au domaine phénoménique qu'elle est censée décrire et expliquer – en leur fournissant, par ce même biais, une interprétation directe et complète.

Ainsi représentée, la structure d'une théorie scientifique en tant que calcul logique partiellement interprété correspond, par conséquent, à l'image qu'évoquait Hempel (1952), car elle consiste en un volet théorique qui « flotte » (« *hover* ») dans l'air, en ceci qu'il est ancré à un soubassement observationnel par le seul intermédiaire des règles de coordination qui le mettent en relation avec le volet empirique que constituent les concepts, justement, empiriques, qui sont, à leur tour, définis, de manière directe et complète, par des opérations observationnelles ou expérimentales – en conformité avec une conception « opérationnaliste » (« *operationalist* ») des concepts physiques (Bridgman 1927, 1936). Il en découle que la conception classique des théories scientifiques, telle qu'elle a été esquissée par Carnap (1939) et développée, successivement, par Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) lui-même, par Hempel (1950b, 1951, 1952, 1954, 1958, 1965) et par Feigl (1970), se fonde sur le présupposé qu'il existerait une distinction entre deux parties du langage formel dont on peut se servir pour reconstruire une théorie donnée, **L**, à savoir, premièrement, le sous-

langage qui permet de représenter les concepts empiriques qui figurent dans une telle théorie, par le biais de termes élémentaires que l'on a choisis comme « *termes primitifs descriptifs* » (« *descriptive primitive terms* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 159) de L , et, deuxièmement, le sous-langage qui permet de représenter les concepts primitifs et les concepts déduits, ou définis, qui apparaissent dans la théorie en question, par l'intermédiaire de termes abstraits que l'on a choisis, eux aussi, comme termes primitifs descriptifs de L . Autrement dit, d'après la manière dont Carnap (1956a) présente la structure du langage L dans un article consacré au « caractère méthodologique des termes théoriques » (« *the methodological character of theoretical terms* »), le premier de ces deux sous-langages est, justement, ce qu'on appelle communément le « langage d'observation » (« *observation language* »), L_O , dont les termes descriptifs relèvent d'un vocabulaire observationnel V_O – c'est-à-dire d'un vocabulaire qui contient uniquement les termes observationnels que l'on peut associer à la théorie en question, qui ne sont rien d'autre que des termes du langage L dénotant ce que Feigl (1970) appelait, justement, des « concepts empiriques » – et qui est associé à un calcul formel K_O ¹⁷⁷ – c'est-à-dire à la restriction de K sur L_O – mais qui ne contient ni de quantificateurs logiques, ni d'opérateurs de modalité¹⁷⁸, ni aucun terme non observationnel de L – c'est-à-dire aucun terme non logique de L qui représente des concepts proprement théoriques (Suppe 1977 ; Vorms 2011, p. 124). L'autre sous-langage dont se compose L est, en revanche, ce qu'on peut appeler un « langage théorique » (« *theoretical language* »), L_T , qui ne contient aucun terme de V_O , mais tous les termes de V_T – c'est-à-dire tous les termes descriptifs de L qui sont de nature théorique, et qui dénotent ainsi des concepts primitifs ou des concepts déduits, pour reprendre, encore une fois, la terminologie de Feigl (1970) – et des signes de constantes logico-mathématiques – tels que « les connecteurs vérifonctionnels usuels (par exemple, la négation et la conjonction) » (« *the usual truth-functional connectives (e.g., for negation and conjunction)* ») et les quantificateurs (« \forall » et « \exists »), ou, éventuellement, des « signes

¹⁷⁷ K_O « doit être tel que tout terme qui n'appartient pas à V_O (i.e., les termes non primitifs [*'nonprimitive terms'*]) dans L_O est explicitement défini [*'explicitly defined'*] dans K_O ; en outre, K_O doit admettre au moins un modèle fini [*'must admit of at least a finite model'*] » (Suppe 1977 ; Vorms 2011, p. 124).

¹⁷⁸ Les opérateurs de modalité sont des opérateurs que l'on peut introduire dans le vocabulaire d'un langage logique comme L afin de formaliser les concepts de possibilité et de nécessité (qui relèvent de la logique aléthique), de savoir et de croyance (qui relèvent de la logique épistémique), d'opinion (qui relèvent de la logique doxastique), d'obligation et de permission (qui relèvent de la logique déontique), ainsi que les distinctions entre passé, présent et futur (qui relèvent de la logique temporelle). Pour ne se limiter qu'à quelques exemples, les opérateurs « \square » et « \diamond » sont des opérateurs de modalité tels que, « étant donné une proposition p , $\diamond p$ se lit 'il est possible que p ' et $\square p$ 'il est nécessaire que p ' » (Wagner 2014, p. 240). Un autre opérateur de modalité est l'« implication stricte » (« *strict conditional* »), introduite par le logicien C. I. Lewis (1918) : « $(p \rightarrow q)$ se lit ' p implique strictement q ', par quoi il faut entendre 'il est impossible que p soit vrai sans que q soit également vrai', ce qu'on peut exprimer par $\neg \diamond (p \wedge \neg q)$ ou par $\square (p \rightarrow q)$ » (Wagner 2014, p. 242).

d'opérateurs de modalités logiques (c'est-à-dire la nécessité logique et l'implication stricte) et des signes d'opérateurs de modalités causales (c'est-à-dire la nécessité causale et l'implication causale) » (« signs for logical modalities (e.g., logical necessity and strict implication) and for causal modalities (e.g., causal necessity and causal implication) »)¹⁷⁹ (Carnap 1956a, p. 42). En outre, ce même sous-langage théorique est également associé au calcul K_T – c'est-à-dire à la restriction de K sur L_T (Suppe 1977 ; Vorms 2011, p. 124). À ces deux sous-langages, il faudrait, néanmoins ajouter également un troisième, c'est-à-dire un « langage d'observation logiquement étendu » (« *logically extended observation language* »), L'_O , qui « ne contient pas de termes de V_T et peut être considéré comme étant formé à partir de L_O en y ajoutant les quantificateurs, les opérateurs de modalité, etc., de L . Le calcul formel K'_O qui lui est associé est la restriction de K sur L'_O » (Suppe 1977 ; Vorms 2011, p. 124). Dans un tel langage, la condition de « définissabilité explicite » (« *explicit definability* ») de tout terme au moyen de termes observationnels élémentaires est remplacée par l'exigence de « réductibilité [à des termes observationnels élémentaires] par le biais de définitions conditionnelles [*reductibility by conditional definitions*] » (Carnap 1956a, p. 51), et donc d'énoncés qui sont formellement équivalents aux énoncés de réduction dont il est question dans Carnap (1936b, 1937), si bien que la différence entre L_O et L'_O tient, en définitive, plus à une question de degré, ou de portée, qu'à une question de nature. Par conséquent, en mettant de côté, du moins pour le moment, ce qui distingue le sous-langage L'_O du sous-langage L_O , en quoi les différences de nature syntaxique qui existent entre ce dernier et le sous-langage L_T nous permettraient-elles de comprendre en quoi consiste l'interprétation (empirique) partielle des théories qui sont reconstruites sur le modèle de la conception classique ?

Afin de répondre à cette question, il suffit de remarquer qu'une telle distinction, de nature syntaxique, est étroitement liée à une autre distinction, de nature essentiellement sémantique. Plus précisément, cette autre distinction consiste en ceci que, comme nous venons de le voir, les termes qui constituent le langage observationnel, L_O , seraient toujours définissables de manière opérationnelle, c'est-à-dire en fonction d'observations ou d'expériences relativement simples, si bien que leur interprétation serait, du moins en droit, toujours directe et complète. À ce sujet, Feigl (1970) citait directement l'un des principaux tenants de l'« opérationnalisme » (« *operationalism* »), c'est-à-dire Percy Williams Bridgman (1927, 1936), en expliquant que, par « définitions opérationnelles », ce dernier entendait des définitions qui sont le résultat d'opérations « distinctement

¹⁷⁹ Carnap (1956a) précise que tous ces opérateurs de modalités sont admissibles, mais nécessitent l'usage d'« un ensemble de règles de déduction (en tant que règles syntaxiques ou sémantiques) qui est considérablement plus compliqué » (« *a considerably more complicated set of rules of logical deduction* ») (Carnap 1956a, p. 42).

observationnelles » (« *distinguishing observational* »), c'est-à-dire d'opérations qui comportent des mesures et des expériences empiriques, par opposition à des opérations de nature purement « logico-mathématique » (« *logico-mathematical* »), c'est-à-dire « computationnelle » (« *computational* ») (Feigl 1970, p. 6)¹⁸⁰. Il remarquait, également, que les définitions opérationnelles, telles que les entendait Bridgman (1927, 1936), s'appliquent principalement à des concepts qui sont « relativement proche du 'plan de l'observation' » (« *fairly close to the 'plane of observation'* »), tels que, par exemple, « le concept de vitesse (moyenne) d'un corps en mouvement [*the concept of (average) velocity of a moving body*'] relativement à une certaine distance dans l'espace et à un intervalle de temps correspondant » (Feigl 1970, p. 6). Un tel concept peut se définir, en effet, par le biais d'une procédure observationnelle très simple, consistant à « déterminer la distance, au moyen d'un étalon ou d'un mètre ruban, etc., et la durée, au moyen d'un chronomètre ou d'un autre appareil chronométrique, en question » (« *determine, with yardstick or tape measure, etc., the distance, and with the help of a stopwatch or other chronometric devices the duration in question* »), ainsi qu'à « diviser le résultat numérique de la première [opération] par le résultat numérique de la seconde » (« *the numerical result of the first by the numerical result of the second* ») (Feigl 1970, p. 6). Bien au contraire, l'interprétation des termes qui relèvent du langage théorique, L_T , s'opérerait toujours indirectement, par l'intermédiaire des règles de coordination qui mettent en relation ce que Carnap (1939) appelait les « termes abstraits » avec les « termes élémentaires », si bien que Feigl (1970) décrivait l'interprétation empirique des premiers en fonction des seconds non pas comme consistant dans une « déduction ascendante », mais comme consistant dans « une percolation ascendante » (« *upward seepage* ») (Feigl 1970, p. 7). De plus, cette différence d'ordre sémantique entre les termes

¹⁸⁰ Pour sa part, Hempel (1954, 1965) résumait les principes fondamentaux de l'« opérationnalisme » (« *operationism* ») de Bridgman (1927, 1936, 1938, 1945, 1951a, 1951b, 1951c) de la manière suivante : 1) « Les significations sont opérationnelles » (« *Meanings are operational* »), si bien que « comprendre la signification d'un terme » (« *understand the meaning of a term* ») signifie « connaître les critères opérationnels qui rendent possible son application » (« *know the operational criteria of its application* »), si bien que « tout terme scientifique doué de signification doit nécessairement être définissable de manière opérationnelle » (« *every meaningful scientific term must therefore permit of an operational definition* »). 2) « Pour éviter toute ambiguïté, chaque terme scientifique devrait être défini au moyen d'un seul et même critère opérationnel » (« *To avoid ambiguity, every scientific term should be defined by means of one unique operational criterion.* »), si bien que, au cas où il serait possible d'utiliser plusieurs critères pour définir un terme donné, il vaudrait mieux subdiviser ce dernier en une classe de termes apparentés, de telle sorte que chaque élément de cette classe corresponde à un critère opérationnel unique. 3) La désambiguïsation des termes scientifiques est nécessaire dans le but « d'assurer la possibilité d'une mise à l'épreuve objective des hypothèses qui sont formulées au moyen de ces mêmes termes » (« *to insure the possibility of an objective test for the hypotheses formulated by means of those terms* ») (Hempel 1954 ; 1965, p. 124-125).

abstraites et les termes élémentaires correspondrait à une distinction, toujours d'ordre sémantique, entre les énoncés qui ne contiennent que des termes qui relèvent de la première catégorie, c'est-à-dire des énoncés qui expriment des contenus purement conceptuels, et les énoncés qui peuvent également contenir des termes de la seconde catégorie, c'est-à-dire des énoncés qui permettent de lier le corps même de la théorie en question à l'expérience empirique et qui peuvent donc, le cas échéant, tenir lieu de règles de coordination.

En conséquence, c'est précisément dans un tel sens que l'on peut affirmer que le langage formel *L*, tel que l'envisageaient Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), Hempel (1950b, 1951, 1952, 1954, 1958, 1965) et Feigl (1970), est « partiellement interprété » (« *partially interpreted* »), puisque, comme l'expliquait Hilary Putnam (1962), « interpréter partiellement un langage formel, c'est interpréter une partie du langage [*'to partially interpret a formal language is to interpret part of the language'*] (c'est, par exemple, traduire certains termes en langage ordinaire et laisser aux autres le statut de symboles non interprétés) » (Putnam 1962 ; Jacob 1980b, p. 250). Il en découle que l'interprétation des théories qui sont reconstruites, en tant que systèmes axiomatiques, sur le modèle de la conception classique est partielle précisément parce que le langage formel dont on se sert pour les reconstruire n'est, lui-même, que partiellement interprété. De plus, une telle conception de l'interprétation des théories scientifiques qui sont reconstruites sous la forme de calculs logiques, en tant qu'interprétation partielle du langage formel qui est associé à ces mêmes calculs, est une conséquence directe de l'argument par lequel Carnap (1939) récusait la méthode de construction des calculs physiques qui consiste à partir du choix d'un certain nombre de termes élémentaires comme termes primitifs et à en déduire des termes abstraits. Comme nous l'avons anticipé plus haut, Carnap (1939) maintenait, en effet, que les lois physiques les plus générales se formuleraient d'emblée sous la forme d'axiomes, au sens « hilbertien » du terme, dont l'ancrage au soubassement empirique de la théorie s'opérerait seulement dans un second moment, si bien qu'il serait toujours possible d'introduire, dans le calcul correspondant, un certain nombre de concepts théoriques fondamentaux au moyen de ces mêmes axiomes, c'est-à-dire en tant que concepts primitifs qui sont dénotés par des termes, eux aussi, primitifs, et non pas par déduction, pour ainsi dire, « ascendante », à partir d'une classe de concepts empiriques qui sont dénotés par des termes élémentaires. D'après cet argument, les énoncés qui ne contiennent que des termes abstraits correspondraient, ainsi, à ce que Carnap (1966) appelle, dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, « les lois théoriques » (« *theoretical laws* »), qui se distinguent des « lois empiriques » (« *empirical laws* ») précisément en ceci qu'elles font référence à des entités « non observables » (« *non observables* »), alors que les énoncés dans lesquels peuvent figurer des termes élémentaires seraient soit des lois empiriques, et donc des lois qui renvoient à des entités observables, soit des

règles de correspondance qui relient une entité non observable dont l'existence est présupposée par une théorie donnée à une entité observable, comme, par exemple, l'énoncé « La température (mesurée par un thermomètre et, de ce fait, observable au sens large...) d'un gaz est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne de ses molécules » (« *The temperature of a gas...is proportional to the mean kinetic energy of its molecules* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 227). Il en découle que la conception « bilingue » de la reconstruction formelle (c'est-à-dire de l'axiomatisation et de la formalisation *stricto sensu*) des théories scientifiques que défendait Carnap (1939, 1966), et qui constitue l'épine dorsale de la conception classique des théories scientifiques, consiste non seulement dans une thèse au sujet du statut logique des théories scientifiques, et des concepts théoriques qui les constituent, mais également dans une thèse au sujet de leur « caractère méthodologique » (« *methodological character* ») (Carnap 1956a), ou épistémologique, et donc, précisément, de ce qui les caractérise en tant que théories et en tant que concepts scientifiques, par opposition aux théories et aux concepts logico-mathématiques.

Un tel argument nous permet, en conséquence, de mieux préciser en quoi consiste la (double) différence qui existe entre les énoncés qui ne contiennent que des termes théoriques (primitifs ou déduits) et les énoncés qui contiennent également ce que Carnap (1939) appelait, du moins en 1939, des « termes élémentaires », c'est-à-dire de mieux préciser en quoi consiste ce que l'on peut considérer comme étant le fondement même de la conception classique des théories scientifiques. Dans le premier cas, ce sont les énoncés théoriques qui définissent – de manière implicite ou bien en tant que conséquences logiques d'énoncés plus fondamentaux – la signification des termes qu'ils contiennent, quoiqu'une telle définition ne puisse qu'être déterminée de manière partielle. La raison en est que le corps conceptuel que constituent ces mêmes énoncés théoriques n'est pas totalement séparé de l'observation empirique, comme c'est le cas pour les théories logiques et mathématiques, mais il est lié à cette dernière par des règles de coordination ou d'interprétation. Il s'ensuit que, comme l'expliquait également Feigl (1970), la signification des termes théoriques dépend, en dernière instance, de « la place qu'ils occupent dans la structure globale du système théorique, qui comporte des postulats, des définitions, des règles de correspondance et, en conclusion, des définitions opérationnelles » (« *their place in the entire theoretical system involving the postulates, definitions, correspondence rules, and finally the operational definitions.* ») (Feigl 1970, p. 7), et non pas des seuls axiomes, ou postulats, qui caractérisent la théorie en question. Dans l'autre cas, en revanche, ce sont les termes élémentaires qui déterminent la signification, ou le sens, des énoncés qui les contiennent et une telle signification dépend entièrement d'un rapport de correspondance sémantique avec des propriétés et des relations qui sont directement observables ou perceptibles. Par conséquent, c'est précisément parce qu'elle préconisait de se servir d'un langage formel partiellement interprété,

dans le sens du terme que nous venons de définir, que la conception classique des théories scientifiques – du moins telle que l’envisageait Carnap (1939) – était à même d’apporter une solution au second problème qu’avait soulevé le programme logiciste. Il s’agissait, nous le rappelons, du problème de construire un langage formel qui puisse remplir la fonction de langage universel de la science, sans estomper, justement, les différences de nature qui existent entre les théories qui relèvent des sciences formelles et les théories qui relèvent des sciences empiriques. De plus, c’est toujours pour une telle raison que l’on peut considérer la conception classique comme étant une manière d’expliciter la structure et le contenu des théories (scientifiques) empiriques, dans la mesure où elle permet de rendre compte non seulement de leur structure logico-syntaxique, mais également de leur signification empirique et, par ce même biais, de leur caractère méthodologique (ou épistémologique), c’est-à-dire de ce qui les distingue des théories logico-mathématiques.

En résumé, la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre métathéorique et métalinguistique, consiste en deux volets. D’une part, elle se compose d’une « métathéorie syntaxique » qui a pour objet la manière dont on peut reconstruire telle ou telle théorie scientifique, sous la forme d’un système axiomatique, par l’intermédiaire d’un langage formel de nature particulière, c’est-à-dire d’un langage dont les termes descriptifs sont dépourvus de toute interprétation (qu’il s’agisse d’une interprétation logique ou d’une interprétation empirique) *a priori*. D’autre part, elle se compose également d’une « métathéorie sémantique » qui définit des règles d’interprétation empirique, *a posteriori*, des systèmes axiomatiques qui possèdent précisément le type de structure syntaxique que décrit l’autre volet de la conception classique, en tant qu’interprétation partielle des termes abstraits qui figurent dans telle ou telle théorie. Par conséquent, c’est précisément l’articulation entre cette métathéorie syntaxique et cette métathéorie sémantique qui permet à la conception classique d’expliquer la signification des théories qui sont reconstruites à son instar, pourvu que, par « signification » de telle ou telle théorie, l’on entende la fonction que remplit cette dernière, c’est-à-dire la manière dont on peut s’en servir pour produire de la connaissance. Mais en quoi consisterait, par conséquent, la fonction d’une théorie scientifique d’après Carnap (1939, 1966) et, plus en général, d’après les empiristes logiques ? Pour utiliser, encore une fois, les mots de Hempel (1958, 1965), nous pouvons décrire la fonction d’une théorie scientifique comme consistant non pas, tout simplement, à fournir un compte rendu d’observation de telle ou telle classe d’expériences particulières, mais « à déceler des régularités dans le flux des événements et, par ce même biais, à établir des lois générales que l’on puisse utiliser pour prédire, post-dire et expliquer [telle ou telle généralisation ou telle ou telle évidence empirique] » (« *to discover regularities in the flux of events and thus to establish general laws which may be used for prediction, postdiction, and*

explanation ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 173)¹⁸¹. Plus précisément, Hempel (1958, 1965) appelait une telle fonction de prédiction, post-diction et explication qu'il attribuait aux théories scientifiques « systématisation » (« *systematization* ») et considérait qu'elle serait double : d'une part, elle consisterait dans la « systématisation déductive » (« *deductive systematization* ») de généralisations et de preuves empiriques par leur déduction à partir de lois scientifiques qui sont de nature purement hypothétique et qui ont la forme logique d'« énoncés strictement universels » (« *strictly universal statements* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 175) ; d'autre part, elle consisterait également dans la « systématisation inductive » (« *inductive systematization* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 176) de généralisations et de preuves empiriques au moyen de lois qui sont tout aussi générales que les précédentes, mais qui ont la forme logique d'« énoncés de probabilité statistique » (« *statistical probability statements* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 175). Autrement dit, alors que les énoncés de lois dont on peut se servir pour systématiser déductivement des généralisations ou des preuves empiriques données sont, dans le cas le plus simple, de la forme « Tous les occurrences de *P* sont des occurrences de *Q* » (« *All cases of P are cases of Q* »), les énoncés de lois que l'on peut utiliser pour systématiser inductivement d'autres généralisations ou d'autres preuves empiriques sont, toujours dans le cas le plus simple, de la forme « La probabilité qu'une certaine occurrence de *P* soit une occurrence de *Q* est égale à *r* » (« *The probability for a case of P to be a case of Q is r* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 176)¹⁸². En conséquence, tandis que les premiers impliquent « une affirmation qui porte sur toutes les occurrences particulières de *P* » (« *an assertion about any particular instance of P* »), les seconds n'affirment rien au sujet de la totalité des occurrences de *P*, « ni même au sujet de tel ou tel ensemble

¹⁸¹ Comme l'écrivait Hempel (1958, 1965) lui-même, « les principes de la mécanique newtonienne [*the principles of Newtonian mechanics*], par exemple, permettent, si l'on connaît les positions et les quantités de mouvement actuelles [*the present positions and momenta*] des objets célestes dont se compose le système solaire, de prédire les positions et les quantités de mouvement de tels objets à un instant futur donné [*for a specified future time*] ou de post-dire ces mêmes positions et ces mêmes quantités de mouvement à un certain instant dans le passé [*for a specified time in the past*] ; de manière similaire, ces mêmes principes permettent d'expliquer les positions et les quantités de mouvement actuelles par rapport à des positions et à des quantités de mouvement précédentes. En plus de rendre compte de faits particuliers [*accounting for particular facts*], les principes de la mécanique newtonienne expliquent également certains 'faits généraux' [*certain 'general facts'*], c'est-à-dire des uniformités empiriques [*empirical uniformities*] telles que les lois du mouvement des planètes de Kepler, puisqu'il est possible de déduire celles-ci de ceux-là » (Hempel 1958 ; 1965, p. 173-174).

¹⁸² Un exemple élémentaire de systématisation inductive d'un événement particulier consiste à expliquer le fait qu'un tel ait contracté la rougeole en remarquant que sa sœur avait précédemment contracté la même maladie, ce qui avait augmenté, par conséquent, la probabilité que la personne en question finisse par être infectée à son tour. Il est possible, en outre, d'utiliser ce même argument inductif pour prédire l'émergence d'autres cas d'infection dans le futur, ou bien pour post-dire l'émergence de cas passés. Voir Hempel (1958 ; 1965, p. 174-175) à ce sujet.

fini d'occurrences de ce genre » (« *even concerning any finite set of such instances* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 176). Il en découle que comprendre une théorie scientifique signifie, toujours du point de vue de Carnap (1939, 1966), comprendre la manière dont elle permet d'effectuer cette double tâche de systématisation. Cela dit, en quoi la manière dont la conception classique explicite la structure et le contenu de telle ou telle théorie nous permet-elle de comprendre également quels sont les *explananda* – c'est-à-dire les phénomènes qu'il faudrait regarder comme dignes d'explication au vu du fait qu'ils structurent tel ou tel domaine empirique – qu'identifie cette dernière ? En quoi la conception classique nous permet-elle d'explicitier également le contenu et la structure des *explanantia*, c'est-à-dire des principes explicatifs, qu'il faut mobiliser afin de rendre compte de ces mêmes *explananda* ? En quoi nous permet-elle de replacer les informations que nous apporte telle ou telle théorie dans une conception plus générale du monde et de la connaissance ? En d'autres termes, en quoi pourrait-on affirmer que la conception classique impose des contraintes qui sont, respectivement, de nature ontologique, épistémologique et cognitive aux théories qui sont reconstruites à son instar, et qu'elle constitue, par conséquent, un véritable cadre conceptuel ?

Chapitre 3

Distinguer l'analytique du synthétique, séparer la théorie de l'observation : la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel « structuraliste »

Comme nous l'avons remarqué dans le chapitre précédent, Carnap (1939) ne considérait pas les systèmes axiomatiques de formules mathématiques comme étant des « systèmes d'informations », c'est-à-dire des systèmes d'énoncés qui ont un contenu factuel et dont on pourrait affirmer, par conséquent, qu'ils sont vrais ou qu'ils sont faux de tel ou tel objet, voire de tel ou tel état de choses en tant que configuration d'objets. Il les regardait, en revanche, comme étant de simples « outils déductifs », c'est-à-dire comme étant des systèmes d'expressions symboliques dont la fonction consiste à établir des relations logico-formelles entre des énoncés qui ont, quant à eux, un contenu factuel bien déterminé. C'est précisément pour une telle raison que Carnap (1939, 1966) estimait que les énoncés mathématiques seraient, tout comme ceux qui relèvent du domaine de la logique, de nature analytique au sens « wittgensteinien » du terme, c'est-à-dire, justement, que les énoncés mathématiques ne décriraient aucun état de choses véritablement existant, tout en étant doués d'une signification cognitive (logique et non pas empirique). En conséquence, il les opposait aux énoncés qui relèvent des sciences empiriques, qu'il considérait comme étant des énoncés dont la fonction consisterait, justement, à décrire la réalité physique, c'est-à-dire comme étant des énoncés synthétiques¹⁸³. Cette dichotomie entre énoncés logico-mathématiques, de nature analytique, et

¹⁸³ Comme l'explique Carnap (1966) lui-même, dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, « la logique a essentiellement pour objet de déterminer la vérité ou la fausseté d'un énoncé en fonction des significations attribuées aux termes de cet énoncé [*logic is concerned solely with whether a statement is true or false on the basis of meanings assigned to the statement's terms*]. Soit la définition suivante du terme 'chien' : 'X est un chien si et seulement si X est un animal doué de certains caractères'. Être un animal fait partie de la signification du terme 'chien'. L'affirmation 'tous les chiens sont des animaux' répond donc dans ces conditions à la définition que Kant [(1781, 1787)] donne du jugement analytique. Elle ne suppose rien de plus que les relations de signification entre les termes qui la composent [*this would be what Kant called an analytic judgment. It involves nothing more than the meaning relations of the terms*'] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 173-174). La nature tautologique – dans un sens plus large du terme « tautologie », c'est-à-dire comme « A-vérité » – d'un énoncé tel que « tous les chiens sont des animaux » devient encore plus évidente lorsqu'on l'exprime au moyen d'une formule de la logique des prédicats, comme, par exemple, « $(\forall x) [C(x) \rightarrow A(x)]$ », où « $C(x)$ » et « $A(x)$ » signifient, respectivement, « être un chien » et « être un animal ». En effet, si nous choisissons un système de règles d'inférence comme, par exemple, le système de la « déduction naturelle » (« *natural deduction* ») (Wagner 2014, p. 219-238 ; 259-262), nous pouvons montrer qu'un tel énoncé de la logique des prédicats du premier ordre n'est rien d'autre

énoncés empiriques, de nature synthétique, mérite, néanmoins, d'être nuancée. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, Carnap (1939) estimait, en effet, que, lorsqu'on les considère dans leur interprétation habituelle, les énoncés de la géométrie constitueraient un système axiomatique doué d'un contenu factuel. Plus précisément, dans *Foundations of Logic and Mathematics*, Carnap (1939) dresse une distinction entre trois significations possibles du terme « géométrie ». Premièrement, Carnap (1939) définissait la géométrie comme « géométrie mathématique », c'est-à-dire comme système axiomatique de formules qui sont dépourvues de toute signification, qu'elle soit logique ou empirique, sauf celle qu'implique l'interprétation indirecte qu'on peut leur attribuer par le biais d'une démonstration de la consistance logique du système en question, en conformité avec la conception hilbertienne de la mathématique formalisée comme « stock de formules » (Hilbert 1922, 1928). Deuxièmement, il envisageait la géométrie comme « géométrie analytique », c'est-à-dire comme système axiomatique de formules auxquelles on a attribué une interprétation logique, en termes de nombres, de n -uplets de nombres et de relations purement formelles, si bien qu'on peut le considérer comme constituant un volet du calcul arithmétique, dont il partage, par conséquent, le caractère analytique. Troisièmement, Carnap (1939) considérait, également, la géométrie dans son interprétation habituelle, et donc en tant que « géométrie physique », c'est-à-dire en tant que système axiomatique d'énoncés qui portent sur les propriétés de l'espace et qui sont, par conséquent, de nature synthétique, en ceci qu'ils contiennent des informations sur la réalité physique. C'est précisément en cela que la géométrie se distinguerait, toujours d'après Carnap (1939), de l'arithmétique, dont l'interprétation habituelle, c'est-à-dire comme théorie des nombres, ainsi que les autres interprétations et applications possibles seraient toutes de nature purement analytique¹⁸⁴. Toujours

$$\frac{C(a) \frac{(6x) C(x) \wedge (A(x) / U(x))}{C(a) \wedge (A(a) / U(a))}}{\frac{A(a) / U(a)}{U(a)}}$$

Par conséquent, c'est précisément en cela que la fonction d'énoncés analytiques tels que « $(\forall x) [C(x) \rightarrow (A(x) \wedge \Phi(x))]$ » consiste à servir d'« outils de déduction dans le domaine de la connaissance empirique » (Carnap 1939).

¹⁸⁴ Il est intéressant de remarquer que la manière dont Carnap (1939) envisageait les différences entre l'arithmétique et la géométrie était diamétralement opposée à la manière dont les concevait un conventionnaliste comme Henri Poincaré (1902). Dans *La Science et l'hypothèse*, ce dernier écrit, en effet, que le principe qui permet aux mathématiciens de démontrer de nouveaux théorèmes au sujet des propriétés des nombres, en procédant par construction d'objets mathématiques toujours plus généraux, est le principe d'induction, qu'il considère comme étant « un véritable jugement synthétique à priori » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 74). Nous pouvons donc en conclure que, contrairement à Carnap (1939), Poincaré (1902) considérait les théorèmes de l'arithmétique comme étant des vérités synthétiques. Quant à la géométrie, en revanche, Poincaré (1902) estimait que ses axiomes « ne sont donc ni des jugements synthétiques à priori ni des faits

comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cette conclusion peut être considérée comme étant une conséquence de ce que William Demopoulos (2013b) a appelé la « thèse de Carnap » (« *Carnap's thesis* »). Il s'agit, plus précisément, de la thèse qu'il existerait des théories mathématiques appliquées qui seraient, néanmoins, de nature analytique et des théories mathématiques appliquées qui seraient, en revanche, de nature synthétique. Cette thèse soulève, par conséquent, la question suivante : comme l'on ne peut pas considérer que tous les énoncés dont se compose une certaine théorie empirique – ou tout du moins une théorie empirique qui contient des énoncés qui relèvent des mathématiques appliquées – sont, *ipso facto*, de nature synthétique, de quelle manière peut-on départager, parmi tous ces énoncés, ceux qui sont de nature analytique des ceux qui sont pourvus d'un véritable contenu factuel ?

Une telle question est d'autant plus importante qu'elle concerne non seulement le caractère logique des théories scientifiques, mais également leur caractère méthodologique (ou épistémologique), comme l'a, d'ailleurs, explicitement reconnu Carnap (Psillos & Carnap 2000) lui-même, au cours d'une communication qu'il a donnée dans le cadre d'une conférence de l'*American Philosophical Association* qui s'est tenue à Santa Barbara, California, en 1959 :

Je crois que {...} nous ne pouvons comprendre la distinction entre la mathématique pure, d'une part, et la physique, qui contient de la mathématique, mais en forme appliquée, d'autre part, [*the distinction between pure mathematics on the one side and physics, which contains mathematics but in applied form, on the other side*'] que si nous explicitons la distinction qui est connue, dans la philosophie traditionnelle, sous les termes 'analytique' et 'synthétique', ou sous les termes 'vérité

expérimentaux. Ce sont des *conventions* ; notre choix, parmi toutes les conventions possibles, est *guidé* par des faits expérimentaux ; mais il reste *libre* et n'est limité que par la nécessité d'éviter toute contradiction. C'est ainsi que les postulats peuvent rester *rigoureusement* vrais quand même les lois expérimentales qui ont déterminé leur adoption ne sont qu'approximatives. En d'autres termes, *les axiomes de la géométrie* (je ne parle pas de ceux de l'arithmétique) *ne sont que des définitions déguisées* » (Poincaré 1902 ; 2014, p. 75-76), si bien qu'ils ne seraient ni analytiques, ni synthétiques, mais tout simplement dépourvus de toute signification, de même que les axiomes de ce que Carnap (1939) appelait la « géométrie mathématique ». Il en découle que la conception carnapienne de la géométrie se démarquait de celle que défendait Poincaré (1902) précisément par le fait qu'elle distinguait la géométrie mathématique de la géométrie physique. En conséquence, aux yeux Carnap (1939), tout comme à ceux d'un autre tenant de l'empirisme logique tel que Hans Reichenbach (1938), « l'erreur du conventionnalisme » consistait, comme l'observe Pierre Jacob (1980a), à « considérer la géométrie sans prendre en considération le reste des croyances physiques. Or, selon qu'on adopte une géométrie euclidienne ou non euclidienne, on devra postuler l'existence de telle ou telle force physique, plus ou moins 'étrange'. Si la géométrie, en tant que telle, se compose de propositions 'analytiques', la conjonction d'une géométrie et des autres hypothèses physiques a des conséquences empiriques testables » (Jacob 1980a, p. 147).

nécessaire' et 'vérité contingente' [*'under the terms analytic and synthetic, or necessary truth and contingent truth'*], ou de n'importe quelle autre manière dont on puisse l'exprimer (Psillos & Carnap 2000, p. 160).

Plus précisément, nous pouvons interpréter cette affirmation de deux manières complémentaires. D'une part, nous pouvons en inférer que Carnap (Psillos & Carnap 2000) entendait affirmer qu'il faut distinguer, encore une fois, les théories logico-mathématiques des théories qui relèvent de la physique (et, plus généralement, des sciences empiriques), aussi mathématisées qu'elles puissent être. D'autre part, nous pouvons également en conclure que, pour ce faire, Carnap (Psillos & Carnap 2000) estimait nécessaire d'opérer une double distinction parmi les énoncés qui sont formulés dans le langage formel, L , que la conception classique préconise d'utiliser pour reconstruire telle ou telle théorie empirique : premièrement, il faut distinguer les « énoncés d'observation » (« *observational sentences* ») (Carnap 1966 ; Psillos & Carnap 2000, p. 158) – c'est-à-dire les énoncés qui ne contiennent que des termes du vocabulaire observationnel V_O – des énoncés théoriques (« *theoretical sentences* ») (Carnap 1966 ; Psillos & Carnap 2000, p. 158) – c'est-à-dire des énoncés qui ne contiennent que des termes du vocabulaire théorique V_T , ou qui contiennent également des termes de ce même vocabulaire ; deuxièmement, il faut départager, justement, les énoncés de L qui sont, de manière générale, analytiques et les énoncés de L qui sont, de manière générale, synthétiques. La valeur méthodologique de la distinction entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques est, par conséquent, elle-même double. D'une part, elle consiste en ceci qu'elle permet d'identifier ce qui distingue les théories empiriques, et notamment les théories empiriques mathématisées, des théories logico-mathématiques. D'autre part, elle tient également au fait qu'elle permet de comprendre la manière dont des énoncés de nature différente peuvent se combiner, dans le cadre d'une théorie empirique donnée, dans le but d'accomplir la double fonction de systématisation des connaissances empiriques, à la fois inductive et déductive, dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Plus précisément, d'un côté, il s'agit d'identifier les énoncés qui relèvent de la logique, des mathématiques pures et des mathématiques appliquées analytiques – et qui ne contiennent, par conséquent, que des termes logico-mathématiques –, ainsi que les énoncés descriptifs que l'on peut considérer comme étant logiquement vrai ou logiquement faux, c'est-à-dire « L-vrais » ou « L-faux », en ceci qu'il est possible d'en établir la valeur de vérité par le biais de règles d'inférence déductive et de règles de substitution permettant de remplacer des variables par des constantes (Psillos & Carnap 2000, p. 160). D'autre côté, il s'agit de repérer les énoncés synthétiques qui expriment le contenu factuel de la théorie en question et qui peuvent éventuellement appartenir aux mathématiques appliquées synthétiques, comme c'est le cas, encore une fois, pour les énoncés qui relèvent de la géométrie physique. Pour ne faire qu'un exemple de l'importance de départager ces deux types d'énoncés, il

suffit de rappeler, comme le faisait Carnap (1966) lui-même, que « la théorie de la relativité... n'aurait pas vu le jour si Einstein [(1921)] ne s'était pas aperçu qu'il est impossible de déterminer la structure de l'espace et du temps physiques sans recourir à l'expérimentation physique [*'if Einstein had not realized that the structure of physical space and time cannot be determined without physical tests'*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 249). Autrement dit, la théorie de la relativité n'aurait jamais vu le jour si Einstein (1921) n'avait pas su faire la part des choses entre les énoncés qui relèvent de la géométrie mathématique non interprétée, ou de la géométrie analytique, et ceux, de nature synthétique, qui relèvent de la géométrie physique, et s'il n'avait pas su comprendre en quoi il était possible d'utiliser les premiers pour établir des relations (déductives) entre les seconds, dans le domaine des sciences physiques (et notamment de la mécanique et de l'électromagnétisme)¹⁸⁵. C'est précisément pour une telle raison que la distinction entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques constituait, aux yeux de Carnap (1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), l'un des piliers fondamentaux de la conception classique des théories scientifiques telle que nous l'avons définie dans les chapitres précédents, c'est-à-dire en tant que cadre métalinguistique et métathéorique qui permettrait d'explicitier la structure et le contenu des théories scientifiques.

Une telle distinction demeure, néanmoins, quelque peu ambiguë, non seulement parce qu'il existe des énoncés mathématiques qui sont, tout de même, de nature synthétique (tels les énoncés de la géométrie physique), mais également parce que des (sous-)langages formels comme L_O et L_T permettent de formuler des énoncés qui ne sont pas analytiques au sens strict du terme, c'est-à-dire « L-vrais » ou « L-faux », mais qui le sont dans un sens plus large, comme le suggérait, encore une fois, Quine (1951, 1953). Plus précisément, il s'agit d'énoncés que l'on peut considérer comme étant analytiques puisque leur valeur de vérité dépend « des significations des termes qu'ils contiennent, mais, contrairement aux [vérités ou faussetés] logiques au sens étroit du terme, également [de] la signification des termes descriptifs » (« *the meanings of the terms, but in distinction to logical truth in the narrower sense, here also in virtue of the meaning of the descriptive terms* ») (Psillos & Carnap

¹⁸⁵ « [Einstein] a vu clairement la frontière [*'the sharp dividing line'*] qui sépare d'un côté les mathématiques pures, avec leurs divers types de géométries logiquement non contradictoires [*'pure mathematics, with its many types of logically consistent geometries'*], et de l'autre la physique, où seules l'expérimentation et l'observation ont le pouvoir de décider lesquelles d'entre les géométries sont susceptibles d'être le plus utilement appliquées au monde physique [*'only experiment and observation can determine which geometries can be applied most usefully to the physical world'*]. Cette distinction entre la vérité analytique (qui comprend la vérité logique et mathématique) [*'analytic truth (which includes logical and mathematical truth)'*] et la vérité empirique [*'factual truth'*] garde encore de nos jours toute son importance dans la théorie quantique [*'quantum theory'*], à mesure que les physiciens explorent la nature des particules élémentaires et cherchent une théorie du champ [*'field theory'*] capable de faire le lien entre la mécanique quantique et la relativité » (Carnap 1966 ; 1973, p. 249-250).

2000, p. 160), si bien que Carnap (1966 ; Psillos & Carnap 2000) appelait « ‘vérité-A’ [*A-truth*] la vérité analytique [*analytic truth*] dans ce sens large » (Carnap 1966 ; 1973, p. 252)¹⁸⁶. Un exemple de « vérité-A » qui peut être formulée dans un langage L_O – pourvu qu’on le construise sous la forme d’un langage d’observation qui ne soit, cependant, pas strictement phénoménaliste – consiste dans l’énoncé « tous les piverts à tête rouge ont la tête rouge » (« *all red-headed woodpeckers have red heads* »), sous l’hypothèse que l’on puisse considérer la propriété « avoir la tête rouge » comme étant « une composante essentielle de [la] signification [du mot ‘pivert à tête rouge’] » (« *an essential component of the meaning* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 252). Un exemple de « vérité-A » que l’on peut énoncer au moyen des termes d’un langage L_T est, en revanche, l’énoncé « la température (absolue) d’un système thermodynamique à l’état d’équilibre macroscopique est égale, à une constante de proportionnalité près, à l’énergie cinétique moyenne de translation des particules dont sont constitués les micro-états du système en question », ou, en notation mathématique,

$$\bar{p} = m\bar{v} = \sqrt{3mk_B T} \rightarrow \bar{E}_k = m\bar{v}^2 = 3k_B T \rightarrow T = \frac{\bar{E}_k}{3k_B} \rightarrow T \propto \bar{E}_k$$

(Gallavotti 1999, p. 9), où \bar{p} est la quantité de mouvement moyenne de ces mêmes particules, m est leur masse, que l’on suppose être la même pour toutes les particules, \bar{v} est leur vitesse moyenne de translation, $\bar{E}_k = m\bar{v}^2$ est, justement, leur énergie cinétique moyenne de translation, définie comme étant le produit de leur masse et du carré de leur vitesse moyenne de translation, $k_B = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg}^\circ\text{K}^{-1}$ est « la constante universelle de Boltzmann » (« *Boltzmann’s universal constant* ») (Gallavotti 1999, p. 9) et T est la température (absolue) du système thermodynamique en question, conçue comme fonction d’état macroscopique. Cet énoncé découle directement des hypothèses au sujet de la « dynamique microscopique » (« *microscopic dynamics* ») (Gallavotti 1999, p. 4) des systèmes thermodynamiques qui sous-tendent les propositions et les modèles qui caractérisent la mécanique statistique, et notamment des hypothèses qui concernent la distribution de probabilité de tous les possibles « micro-états » (« *microscopic states* ») (Gallavotti 1999, p. 3) de tel

¹⁸⁶ « La vérité logique, ou ‘vérité-L’, [*logical truth or ‘L-tuth’*] est le premier type de vérité analytique. Une proposition est L-vraie lorsqu’elle est vraie en vertu de sa forme et du sens des termes logiques qui y figurent [*it is true in virtue of its form and of the meaning of the logical terms occurring in it*]...Par conséquent, tous les énoncés logiquement vrais [c’est-à-dire L-vrais] sont A-vrais, bien que tous les énoncés A-vrais ne soient pas L-vrais...Un énoncé A-vrai, mais non pas L-vrai, est vrai en vertu de la signification attribuée à ses termes descriptifs et aussi de celle attribuée à ses termes logiques [*is true because of the meanings assigned to its descriptive terms as well as because of the meanings of its logical terms*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 252).

ou tel système¹⁸⁷. C'est pour une telle raison que nous pouvons le considérer soit comme étant l'un des axiomes que l'on pourrait mettre au fondement d'une possible reconstruction formelle (en tant qu'axiomatisation et formalisation *stricto sensu*) de la mécanique statistique, soit comme étant l'une des conséquences logiques de ces mêmes axiomes. Plus précisément, on peut l'envisager comme n'étant rien d'autre qu'une définition du concept même de « température », en tant que concept défini ou déduit – pour reprendre, encore une fois, la terminologie de Feigl (1970) – de la mécanique statistique, qui fait référence à des concepts théoriques primitifs de ce même domaine de la physique, c'est-à-dire, justement, les concepts de « masse » et de « vitesse moyenne de translation » des particules qui sont supposées constituer les micro-états d'un système thermodynamique donné. Autrement dit, tout comme dans le cas de la relation qui existe entre la signification du terme « pivot rouge » et la propriété « avoir la tête rouge », il est possible d'avancer l'hypothèse que les concepts que désignent les termes descriptifs de la mécanique statistique « masse », ou « m », et « vitesse moyenne de translation », ou « \bar{v} », constituent une « composante essentielle » de la signification du terme « température (absolue) », ou « T », toujours en tant que terme descriptif de la mécanique statistique¹⁸⁸. Néanmoins, en quoi une telle hypothèse serait-elle effectivement justifiée ? Plus

¹⁸⁷ « Un *micro-état* se décrit en précisant, à un instant donné, la valeur des positions et des quantités de mouvement (ou, ce qui est équivalent, des vitesses) [*the value of positions and momenta or equivalently velocities*] de chacune des N particules [qui sont supposées constituer le système thermodynamique en question]. Il est donc nécessaire de préciser la valeur des $3N + 3N$ coordonnées qui identifient un point donné dans l'espace des phases [*coordinates that determine a point in phase space*] de ce même système, dans le sens que prend ce terme dans le domaine de la mécanique » (Gallavotti 1999, p. 3).

¹⁸⁸ La possibilité d'émettre des hypothèses d'une telle nature, et donc de considérer des énoncés qui ne contiennent que des termes qui font référence à des entités théoriques comme étant analytiques au sens large du terme, ou A-vrais, joue, d'ailleurs, un rôle central dans la conception carnapienne de la science, et de sa reconstruction formelle, même par-delà la nécessité de distinguer le statut épistémologique des mathématiques (pures et appliquées) analytiques de celui des sciences empiriques mathématisées. Elle constitue, en effet, la condition de la possibilité même de ce que nous avons appelé le « principe de tolérance sémantique », et donc la condition de la possibilité même de concevoir l'introduction de termes qui dénotent des « entités abstraites » (« *abstract entities* ») (Carnap 1950b) dans un cadre linguistique donné comme étant une question non pas de nature ontologique, mais de nature pragmatique et (méta)sémantique, puisqu'il ne s'agirait pas de s'assurer du fait que les entités en question existent effectivement en dehors du cadre lui-même, mais, comme l'écrivait toujours Quine (1951, 1953), de « choisir une forme de langage commode, un schème conceptuel ou un cadre commode pour la science » (« *choosing a convenient language form, a convenient conceptual scheme or framework for science* ») (Quine 1953 ; Jacob 1980b, p. 120). Plus précisément, Carnap (1950b) considérait que, afin que l'on puisse dépouiller un énoncé comme « Cinq est un nombre » (« *Five is a number* ») (Carnap 1950b ; 1997, p. 329) de tout présupposé ontologique, il serait nécessaire d'étendre le cadre linguistique dans lequel on entend le formuler, en y introduisant, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, « de nouvelles formes linguistiques » (« *new linguistic forms* »), c'est-à-dire ce que Carnap (1950b) lui-même appelait « le cadre des nombres » (« *the framework of numbers* »)

généralement, en quoi serait-il effectivement possible d'effectuer une distinction entre les énoncés d'un langage *L* qui sont vrais en vertu de la signification des termes descriptifs qu'ils contiennent, c'est-à-dire qui sont A-vrais, et les énoncés de ce même langage qui sont vrais en fonction d'un quelque contenu factuel, c'est-à-dire qui sont des vérités synthétiques ? En quoi consistent les solutions que Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a lui-même proposées, dans le but de résoudre un tel problème ? Et pour quelles raisons le fait d'analyser de telles solutions pourrait-il nous permettre de mieux comprendre en quoi la conception classique des théories scientifiques constituerait un véritable cadre conceptuel ?

Afin de répondre à des telles questions, nous analyserons deux visions alternatives de la conception classique des théories scientifiques, non seulement en tant que cadre métathéorique et métalinguistique, mais également en tant que cadre conceptuel. La première, que nous attribuerons à Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), est une vision holiste, d'après laquelle il serait impossible de tracer une ligne de démarcation nette entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques, si bien qu'il faudrait considérer les postulats par le biais desquels on peut reconstruire la structure et le contenu d'une théorie donnée comme constituant un système unifié d'énoncés synthétiques. La

et qui consiste, premièrement, dans un système de variables qui permettent d'envisager l'ensemble des nombres naturels comme n'étant rien d'autre que le parcours des valeurs de ces dernières, ainsi que, deuxièmement, du prédicat d'ordre supérieur « nombre » (« *number* »), qui permet d'affirmer que tel ou tel individu *x* appartient précisément à ce genre d'entités que l'on peut appeler « nombres » (Carnap 1950b ; 1997, p. 329). Faire cela signifie, en effet, transformer la question de savoir si l'énoncé « Cinq est un nombre » est vrai en une « question interne » (« *internal question* ») (Carnap 1950b) au cadre linguistique que l'on vient d'étendre, en ceci que, afin de pouvoir la trancher, il suffit d'appliquer la règle sémantique, relevant du métalangage associé à ce même cadre, « [le mot] 'Cinq' désigne un nombre » (« '*Five*' designates a number ») (Carnap 1950b ; 1997, p. 329). Néanmoins, cette règle est, à son tour, équivalente à l'énoncé suivant, issu du même métalangage (sémantique) : « l'énoncé 'Cinq est un nombre' est vrai si et seulement si le terme 'Cinq' est une constante de prédicat du langage formel en question et il appartient au parcours de vérité du prédicat 'être un nombre', qui est d'ordre supérieur à celui que désigne le terme 'Cinq' lui-même ». Il en découle que la règle sémantique dont il faut se servir pour déterminer la valeur de vérité de l'énoncé « Cinq est un nombre » nous dit qu'une telle valeur de vérité dépend uniquement des parcours de vérité des termes « Cinq » et « nombre » en tant que prédicats de niveaux différents, et donc – sur la base du présupposé que « les conditions de vérité d'un énoncé en constituent la signification [*the truth-conditions of a sentence constitute its meaning*]', et que comprendre [*understanding*] cette signification consiste à connaître [*knowing*] de telles conditions » (Carnap 1942, p. 28) – de leurs significations telles qu'elles ont été fixées lorsqu'on a introduit, dans le cadre linguistique en question, ce que Carnap (1950b) appelait, encore une fois, « le cadre des nombres ». Par conséquent, cette règle nous dit, tout simplement, que l'énoncé « Cinq est un nombre » est A-vrai, si bien qu'elle ne fait rien d'autre que traduire, dans le langage métasémantique qui a pour objet le langage formel du cadre en question, l'hypothèse que l'on puisse considérer la propriété « être un nombre » comme étant, encore une fois, une « composante essentielle » de la signification du terme « cinq », en tant que terme descriptif qui appartient au « cadre des nombres » lui-même.

seconde, que nous attribuerons à Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000), consiste, en revanche, en une vision que nous qualifierons de « dichotomique ». Elle repose, en effet, sur le présupposé que, afin de reconstruire telle ou telle théorie, il serait nécessaire d'en séparer les composantes analytiques et synthétiques, puisque faire cela nous permettrait, justement, d'identifier, d'une part, le contenu conceptuel de la théorie en question et, d'autre part, son contenu empirique. C'est ainsi que, dans le but d'effectuer une telle comparaison, nous verrons, dans un premier temps (section 1), en quoi Carnap (1936b, 1937, 1952) a essayé de déterminer les conditions logiques que devrait satisfaire tel ou tel énoncé afin qu'on puisse le regarder comme étant une définition implicite et analytique, quoique non nécessairement complète et définitive, de la signification des termes qui y figurent, qu'il s'agisse de termes théoriques ou de termes observationnels. Pour ce faire, nous prendrons en considération ce que Carnap (1952) lui-même appelait des « postulats de signification » (« *meaning postulates* ») (Carnap 1952), ainsi que les énoncés de réduction (et notamment les énoncés de réduction bilatéraux) (Carnap 1936b, 1937) dont nous avons déjà parlé dans les chapitres précédents. Cela nous amènera à la conclusion que ni la première, ni la seconde catégorie d'énoncés ne seraient à même de nous livrer des définitions implicites et analytiques qui puissent s'appliquer à des termes d'un langage théorique, vu que les significations de ces derniers se distinguent de celles des termes d'un langage observationnel en ceci qu'elles sont, en vertu de la nature même du langage dont elles relèvent, inachevées et sujettes à révision. Dans le cadre de cette analyse critique des postulats de signification et des énoncés de réduction, nous nous appuierons sur les arguments qu'a développés Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) afin de montrer qu'il faudrait considérer une théorie donnée comme consistant dans un système de postulats théoriques et interprétatifs qui remplirait deux fonctions complémentaires, à savoir non seulement la fonction d'interprétation (empirique) des énoncés de la théorie en question, mais également la fonction de systématisation (c'est-à-dire d'explication, de prédiction ou de post-diction) des conséquences empiriques que l'on peut en tirer. C'est précisément à partir d'une telle conclusion que Hempel (1954, 1958) pouvait affirmer qu'il faudrait abandonner la distinction entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques, tout en considérant qu'une telle position ne serait qu'un approfondissement du pragmatisme caractéristique de la conception carnapienne de la signification empirique. Mais est-ce que la manière dont Carnap (1956a) a lui-même développée une telle conception, dans le cadre de son analyse du caractère logique et méthodologique des concepts théoriques, se prêterait-elle à une interprétation de cette nature ? Quels sont les points de concordance que l'on pourrait effectivement identifier entre la vision carnapienne de la reconstruction formelle des théories scientifiques et celle que défendait, justement, Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) ?

Afin de répondre à ces autres questions, nous nous pencherons, dans un deuxième temps (section 2), sur deux articles de Carnap (1956a, 1958) qui nous permettront d'analyser la façon dont ce dernier envisageait la structure syntaxique du langage observationnel, L_O , et du langage théorique, L_T , dans le but de déterminer un nouveau critère de signification empirique pour les termes qui relèvent de ce dernier. Nous verrons, ainsi, que Carnap (1956a, 1958) considérait les termes du langage théorique comme étant des schémas conceptuels, c'est-à-dire comme étant des variables et des fonctions propositionnelles, d'ordre supérieur au premier, qui sont « *L-indéterminés* » (« *L-indeterminate* ») (Carnap 1947), qui désignent des entités logico-mathématiques, physiquement caractérisées, et que l'on peut définir, relativement à certaines classes de termes observationnels, au moyen de deux ensembles de postulats, à savoir des postulats théoriques et des postulats de correspondance. Il se trouve qu'une telle vision de la syntaxe et de la sémantique des théories scientifiques, au prisme de la conception classique, est compatible avec une interprétation holiste de cette dernière, et notamment en ceci qu'elle repose, elle aussi, sur le présupposé qu'il serait impossible de distinguer la fonction linguistique d'interprétation empirique de celle qui consiste à produire de nouvelles connaissances factuelles par la systématisation théorique de celles dont on dispose déjà. Nous montrerons, ainsi, en quoi la manière dont Carnap (1956a, 1958) présente la conception classique des théories scientifiques, dans les deux articles qui nous intéressent ici, permet d'en donner une lecture holiste, non seulement en tant que cadre métathéorique, mais également en tant que cadre conceptuel qui imposerait aux théories qui sont reconstruites à son instar des contraintes que l'on pourrait qualifier de « substantielles », en ceci qu'elles toucheraient à la substance même de ces théories, à savoir aux architectures conceptuelles qui les structures et à leurs contenus empiriques. Plus précisément, de telles contraintes sont de nature ontologique, épistémologique et cognitive. Cela dit, pour quelles raisons Carnap (1958a, 1961a, 1963 ; Psillos & Carnap 2000) a-t-il fini par récuser une interprétation holiste de la conception classique, en faveur d'une vision alternative, qui permette de sauver la dichotomie de l'analytique et du synthétique ? Notre thèse est que la raison fondamentale qui a poussé Carnap (1958a, 1961a, 1963 ; Psillos & Carnap 2000) à maintenir une telle distinction consiste en ceci qu'une conception holiste de la reconstruction des théories scientifiques comme systèmes d'énoncés synthétiques soulève le problème de l'indispensabilité des termes théoriques : si le contenu conceptuel d'une théorie donnée était effectivement inséparable de son contenu empirique, s'il était possible d'exprimer ce dernier en établissant des liens nomologiques directs entre énoncés observationnels, en quoi consisterait, donc, l'utilité des suprastructures théoriques ? C'est ainsi que, dans un troisième temps (section 3), nous analyserons la manière dont Hempel (1958, 1963, 1965) et Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) ont taché de résoudre un tel problème en se servant de deux méthodes qui permettent de remplacer des expressions théoriques par des

expressions observationnelles, à savoir la méthode d'axiomatisation de William Craig (1953, 1956) et la construction d'énoncés de Ramsey (1929, 1931). En particulier, nous nous concentrerons sur la manière dont Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) s'est servi des énoncés de Ramsey (1929, 1931) afin de proposer deux formalismes alternatifs à celui qui permet de reconstruire telle ou telle théorie sur la base d'un système de postulats **TC**, et que l'on pourrait considérer comme étant autant de formulations alternatives du volet (méta)syntaxique de la conception classique. Plus précisément, le but de ces formalismes consiste non seulement à distinguer les composantes analytiques d'une théorie donnée de ses composantes synthétiques, mais également à fournir les moyens de réduire les termes théoriques à des termes observationnels et à des constantes logiques, par le biais de définitions explicites, quoique non entièrement déterminées, des premiers en fonction des seconds. L'analyse de ces formalismes nous permettra, ainsi, de comprendre en quoi il serait possible de qualifier la vision de la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre conceptuel, qu'a fini par développer Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), en alternative à celle que prônait Hempel (1958, 1963, 1965), de « dichotomique », ainsi que de « structuraliste ». D'une part, la manière dont Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) envisageait la conception classique des théories scientifiques reposait, en effet, sur le présupposé qu'il existerait une différence entre deux catégories d'énoncés, à savoir les énoncés analytiques et les énoncés synthétiques. D'autre part, elle était également fondée sur l'idée que les objets physiques en tant que tels, et notamment les objets auxquels font référence les termes théoriques des langages des sciences empiriques, ne constituerait pas la « matière première », pour ainsi dire, de notre connaissance scientifique. Bien au contraire, cette connaissance porterait, en dernière analyse, sur les relations, justement, structurelles que l'on pourrait établir entre des contenus observationnels au moyen des outils de la logique formelle. Nous pourrions donc en conclure que la conception classique des théories scientifiques nous livre un exemple paradigmatique de cadre conceptuel qui serait, justement, structuraliste. Cela dit, en quoi une telle conception de ce qu'est un cadre conceptuel s'appliquerait-elle au cas particulier de la théorie synthétique de l'évolution ? Quelles sont les problématiques philosophiques et historiographiques que soulèverait l'analyse de la Synthèse Moderne que l'on pourrait mener dans un tel cadre ?

3.1 Comment définir le concept d'« analyticité » en relation aux langages théoriques ? Les limites des postulats de signification et des énoncés de réduction

Comme l'a reconnu Carnap (1952, 1966) lui-même, ce fut Quine (1951, 1953) qui souleva en premier la question de la différence entre les tautologies *stricto sensu*, c'est-à-dire les vérités-L, et les

tautologies *lato sensu*, c'est-à-dire les vérités-A. Plus précisément, cette distinction s'inscrivait, chez Quine (1951, 1953), dans une critique radicale du « dogme de l'analyticité » (« *dogma of analyticity* »), c'est-à-dire, comme nous l'avons déjà vu, de la thèse d'après laquelle il serait possible d'établir une distinction nette entre énoncés synthétiques et, justement, énoncés analytiques, dans les deux sens du terme. Le but de Quine (1951, 1953) était, en effet, de montrer que tout effort de définir le concept même d'analyticité serait voué à l'échec, en ceci qu'il finirait par aboutir soit à une pétition de principe – au cas où l'on tâcherait de définir le concept de vérité-A au moyen du concept de « synonymie cognitive » (« *cognitive synonymy* »)¹⁸⁹. – soit à une régression à l'infini – au cas où l'on essaierait de définir les concepts de vérité-A et de vérité-L par l'intermédiaire d'un ensemble de

¹⁸⁹ Plus précisément, Quine (1951, 1953) observait qu'il est possible de rendre compte de l'analyticité, au sens de vérité-A, d'un énoncé comme « Tous les lapins sont des lièvres domestiques » en montrant que les mots « lapin » et « lièvre domestique » sont « synonymes du point de vue cognitif » (« *cognitively synonymous* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 106), c'est-à-dire en montrant que leurs significations (cognitives) respectives coïncident. Mais comment pourrait-on expliciter, à son tour, le concept de synonymie cognitive ? Une définition possible consisterait à affirmer que deux expressions linguistiques sont cognitivement synonymes si et seulement si elles sont mutuellement substituables « dans tous les contextes et sans changement de valeur de vérité – selon l'expression de Leibniz...*salva veritate* » (« *in all contexts without change in truth value – in Leibniz's phrase...salva veritate* ») – « sauf pour les occurrences à l'intérieur des mots [composés] » (« *apart from occurrences within words* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 101), tels que les termes « chaud lapin » et « 'lapin' » (lapin entre guillemets). Mais est-ce que la « substituabilité *salva veritate* » (« *interchangeability salva veritate* ») constitue-t-elle une condition suffisante pour que l'on puisse définir le concept de synonymie cognitive ? Afin que cela soit le cas, comme le remarquait toujours Quine (1951, 1953), il est nécessaire non seulement que les termes en question soient « extensionnellement équivalents » (« *agree extensionally* »), c'est-à-dire qu'ils soient « vrais des mêmes objets » (« *true of the same objects* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 104), mais également qu'ils soient « intensionnellement » équivalents. Autrement dit, il faut que l'équivalence extensionnelle entre les termes en question découle directement de la signification de ces derniers, de telle sorte qu'il s'agisse d'une équivalence nécessaire, et non pas tout simplement accidentelle, comme c'est le cas, par exemple, pour l'équivalence extensionnelle des termes « créature ayant un cœur » (« *creature with a heart* ») et « créature ayant des reins » (« *creature with kidneys* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 104). Il s'ensuit que, afin que l'on puisse montrer que l'énoncé « tous les lapins sont des lièvres domestiques » est A-vrai, il est nécessaire de prouver la vérité de l'énoncé « tous les lapins sont nécessairement des lièvres domestiques », mais, pour ce faire, il faut maîtriser, au préalable, la signification de l'adverbe « nécessairement » (« *necessarily* »), ce qui présuppose, justement, une compréhension, du moins intuitive, du concept même d'analyticité. C'est pourquoi Quine (1951, 1953) pouvait donc en conclure que la synonymie cognitive de deux expressions données ne consisterait pas dans leur substituabilité *salva veritate*, mais dans leur « substituabilité *salva analyticitate* » (« *interchangeability salva analyticitate* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 106), si bien que, chaque fois que l'on essaierait d'utiliser un tel concept pour expliciter celui d'analyticité, on finirait par tomber dans une pétition de principe.

règles sémantiques données¹⁹⁰. C'est précisément à la suite d'une telle critique que l'auteur de *Les deux dogmes de l'empirisme* (*Two Dogmas of Empiricism*) avait fini par en conclure qu'il serait judicieux d'abandonner complètement la dichotomie entre vérités analytiques et vérités synthétiques, puisque cette dernière ne serait pas autre chose que l'avatar le plus récent d'une autre dichotomie, de nature métaphysique, dont l'empirisme (y compris l'empirisme logique) était censé se défaire une fois pour toutes, c'est-à-dire la distinction entre vérités nécessaires et vérités contingentes. C'est pourquoi Quine (1951, 1953) présentait la forme d'empirisme qu'il proposait lui-même, en alternative à l'empirisme (logique) qui se fondait sur le dogme de l'analyticité et sur le dogme du réductionnisme, comme consistant dans « un pragmatisme plus profond » (« *a more thorough pragmatism* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 121) que celui qu'impliquait la conception carnapienne de la science et de sa reconstruction formelle. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cette conception comportait, en effet, une « attitude pragmatiste » (« *a pragmatic stand* ») quant au choix des formes syntaxiques et des règles sémantiques qui structurent les cadres linguistiques par lesquels s'organise le savoir scientifique, mais non pas au sujet, justement, de « la prétendue frontière entre l'analytique et le synthétique » (« *the imagined boundary between the analytic and the synthetic* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 121). C'est pourquoi l'on peut envisager la critique de l'analyticité qui a été développée par Quine (1951, 1953) comme une tentative d'accomplir la même tâche que Carnap (1934, 1939, 1950b) avait fini par s'imposer à soi-même. Cette tâche consisterait, plus précisément, à reconstruire le savoir scientifique sous la forme d'un système d'énoncés qui est, certes, contraint par l'expérience empirique, mais uniquement, pour ainsi dire, par le biais de « frictions » entre concepts et phénomènes qui s'exercent à la marge de l'échafaudage logique et épistémologique qui le structure, si bien que ce dernier ne saurait se réduire à une simple taxonomie de phénomènes et de relations entre phénomènes. Cependant, il n'en demeure pas moins vrai que, toujours d'après Quine (1951, 1953), une telle tâche nécessitait de concevoir le système du savoir scientifique « de manière

¹⁹⁰ « Et pourtant nous n'avons pas vraiment progressé. Au lieu de faire appel au mot inexpliqué 'analytique' [*'unexplained word 'analytic'*], nous faisons maintenant appel à une expression inexpliquée 'règle sémantique' [*'unexplained phrase 'semantical rule'*]. On ne peut pas donner le statut de règle sémantique à n'importe quel énoncé vrai qui déclare que les énoncés d'une certaine classe sont vrais – autrement, *toutes* les vérités seraient 'analytiques', dans le sens où elles seraient vraies conformément aux règles sémantiques [*'otherwise all truths would be 'analytic' in the sense of being true according to semantical rules'*]. Apparemment, on ne peut distinguer les règles sémantiques que par le fait qu'elles apparaissent sur une page sous le titre 'Règles sémantiques' [*'under the heading 'Semantical Rules'*]; et ce titre est lui-même dépourvu de signification [*'meaningless'*] » (Carnap 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 108), d'où la régression à l'infini – qui consiste, justement, à rendre compte de termes inexpliqués au moyen d'autres termes inexpliqués – dans laquelle on tombe lorsqu'on essaie d'explicitier la signification des concepts de vérité-L et de vérité-A au moyen d'une certaine classe de règles sémantiques.

dynamique », c'est-à-dire comme étant « un champ de forces, dont les frontières seraient l'expérience » (« *a field of force whose boundary conditions are experience* »). Au sein d'un tel champ, les valeurs de vérité des différents énoncés seraient, ainsi, constamment « redistribuées » (« *redistributed* ») entre ces derniers, en fonction des relations logiques qu'ils entretiennent les uns avec les autres et dans le but de maintenir une forme d'équilibre, toujours dynamique, au sein du champ lui-même, chaque fois que ce dernier se trouverait à faire face, justement, aux frictions que l'expérience exercerait à ses frontières (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 117). Cette « réévaluation » (« *reëvaluation* ») des différents énoncés ne s'effectuerait, néanmoins, pas de manière homogène, mais suivant un gradient croissant qui irait des énoncés qui occuperaient une place plus centrale dans le champ en question, et qui seraient donc moins susceptibles d'être réévalués, à ceux qui occuperaient une place plus périphérique, et qu'il serait donc plus facile de réajuster en fonction des « stimulations sensorielles » (« *sensory stimulation* ») dont nous sommes constamment bombardés (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 121). Par conséquent, comme l'observe également Demopoulos (2013b)¹⁹¹, c'était précisément une telle dichotomie entre énoncés centraux et énoncés périphériques que Quine (1951, 1953) proposait de substituer à celle de l'analytique et du synthétique.

Ainsi interprété, l'approfondissement d'une vision pragmatique de la science comme construction de cadres linguistiques que prônait Quine (1951, 1953) peut donc être considéré comme une tentative de déconstruire la frontière entre l'analytique et le synthétique afin d'étayer une double thèse : d'une part, une conception de ce que Quine (1951, 1953) lui-même appelait « le schème conceptuel de la science » (« *the conceptual scheme of science* ») comme étant, « en dernière instance » (« *ultimately* »), « un instrument destiné à prédire l'expérience future, à partir de l'expérience passée » (« *a tool...for predicting future experience in the light of past experience* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 119) ; d'autre part, une conception des objets abstraits dont semblent parler les théories scientifiques comme « intermédiaires commodes » (« *convenient intermediaries* ») qui permettent de systématiser et d'anticiper l'expérience empirique, mais qui « ne trouvent place [, d'un

¹⁹¹ « La difficulté soulevée dans la section 4 de 'Les deux dogmes' (la section intitulée 'Règles sémantiques') consiste en ceci que le simple fait de stipuler l'analyticité des énoncés de la logique et des mathématiques ne peut pas étayer les conclusions philosophiques que leur caractérisation en tant qu'énoncés analytiques est supposée justifier [*merely stipulating the analyticity of the propositions of logic and mathematics cannot support the philosophical claims which their characterization as analytic is supposed to warrant*']. Quine [(1951, 1953)] en concluait que le seul candidat plausible au rôle d'*explicatum* du concept de vérité analytique est le critère qui repose sur la centralité d'un énoncé dans notre cadre conceptuel [*the only viable candidate for explicating analytic truth is one based on a proposition's centrality to our conceptual framework*'] » (Demopoulos 2013b, p. 32).

point de vue ontologique et épistémologique,] dans notre conception que pour autant qu’[ils] sont culturellement [postulés] » (« *enter our conception only as cultural posits* ») (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 119) et pour autant qu’ils contribuent à « la simplicité des lois » (« *the simplicity of laws* ») qu’ils permettent de formuler (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 120). Du moins dans ses grands traits, une telle conception de la science et de ses objets semblerait être, en conséquence, entièrement compatible avec la thèse que Stathis Psillos (1999) a qualifiée de « neutralisme carnapien » (« *Carnap’s neutralism* »), en tant que voie moyenne entre le réalisme et l’instrumentalisme¹⁹², et que l’on pourrait paraphraser de la manière suivante. D’une part, le principe de tolérance sémantique nous permet de dépouiller les termes abstraits qui figurent dans les théories scientifiques de toute implication ontologique et d’envisager le choix de tel ou tel cadre linguistique comme étant une question pragmatique, qui tient, entre autres choses, à l’efficacité du cadre en question en tant qu’outil de systématisation, déductive ou inductive, de l’expérience empirique. D’autre part, les théories scientifiques ne sauraient, néanmoins, se réduire au simple rôle d’outils computationnels plus ou moins commodes, comme en témoignerait, toujours d’après Carnap (1966), la contribution capitale que la construction de langages formalisés et abstraits a apportée à l’avancement des sciences empiriques, et notamment à l’avancement de la physique¹⁹³, si bien qu’il serait légitime d’en inférer que c’est précisément en raison du fait qu’elles contiennent des termes abstraits, et non pas malgré cela, que les théories peuvent prédire, post-dire ou expliquer l’expérience

¹⁹² « Le but de Carnap [(1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000)] est de défendre une forme de *neutralisme authentique* [*a sort of genuine neutralism*] au sujet de la question des implications existentielles des théories scientifiques [*the*

existential implications of scientific theories] : les théories scientifiques ne nous engagent pas à reconnaître l’existence d’entités non observables [*unobservable entities*], mais les théories scientifiques ne sont pas non plus de simples instruments de ‘prévision et contrôle’ [*not merely instruments for ‘prediction and control’ either*] » (Psillos 1999, p. 40)

¹⁹³ En parlant des progrès qui s’étaient accomplis dans le domaine de la mécanique quantique, Carnap (1966) remarquait, par exemple, ce qui suit : « Je suis convaincu que deux courants qui ont été à l’origine d’améliorations considérables portant sur le langage des mathématiques [*great improvements in the language of mathematics*] au cours du dernier demi-siècle ne manqueront pas d’apporter au langage de la physique des précisions et clarifications tout aussi importantes [*equally effective in sharpening and clarifying the language of physics*]. Je pense d’une part à l’application de la logique moderne et de la théorie des ensembles [*the application of modern logic and set theory*] ; et d’autre part à l’adoption de la méthode axiomatique sous sa forme moderne [*the axiomatic method in its modern form*] [, c’est-à-dire dans sa forme hilbertienne], laquelle implique un langage systématique et formalisé [*formalized language system*]. Dans la physique contemporaine, où non seulement le contenu des théories, mais aussi la structure conceptuelle tout entière de la physique [*the entire conceptual structure of physics*] font l’objet de discussions, l’une et l’autre de ces méthodes peuvent s’avérer extrêmement utiles » (Carnap 1966 ; 1973, p. 282-283).

empirique de manière aussi efficace. Cela dit, il n'en demeure pas moins que l'on peut identifier au moins deux différences fondamentales entre l'« empirisme sans les dogmes » (« *empiricism without the dogmas* ») que prônait Quine (1951, 1953) et le neutralisme carnapien. Premièrement, tout en n'adhérant à aucune forme d'« instrumentalisme éliminativiste » (« *eliminative instrumentalism* »), c'est-à-dire à aucune conception du « jargon théorique » (« *t-discourse* ») comme consistant dans une simple « opération de manipulation symbolique, dépourvue de tout contenu théorique proprement dit » (« *symbol manipulation, without proper theoretical content* ») (Psillos 1999, p. 15), l'empirisme de Quine (1951, 1953) semble, néanmoins, reléguer au second plan la fonction épistémique des cadres linguistiques dont se compose le savoir scientifique. Deuxièmement, alors que, pour les raisons que nous avons vues plus haut, Carnap (1939, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) insistait sur l'importance de distinguer les composantes analytiques des théories empiriques – et notamment celles qui relèvent des mathématiques analytiques (pures et appliquées) – aussi bien de leurs composantes mathématiques, mais de nature synthétique, que de leurs composantes proprement empiriques, Quine (1951, 1953) était de l'avis opposé. Il estimait, en effet, que « l'ensemble de la science, mathématique, naturelle et humaine est...sous-déterminée par l'expérience » (« *total science, mathematical and natural and human, is...underdetermined by experience* »), si bien que toute différence entre « la question de savoir s'il existe des classes » (« *the issue over there being classes* ») dans les mathématiques et en logique et celle « de savoir s'il existe des centaures ou des maisons en brique dans la rue des Ormes » (« *the issue over there being centaurs, or brick houses on Elm Street* ») ne serait, en définitive, « qu'une différence de degré » (« *difference...in degree* »), qui proviendrait « de notre inclinaison vaguement pragmatique [*our vaguely pragmatic inclination*'] à ajuster tel fil d'étoffe de la science, plutôt que tel autre, pour accommoder une expérience récalcitrante particulière [*accommodating some particular recalcitrant experience*'] » (Quine 1951, 1953 ; Jacob 1980b, p. 120-121).

Nous pouvons donc en conclure que c'est précisément à la lumière de ces deux différences qu'il faudrait comprendre la divergence de vues qui existait entre Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et Quine (1951, 1953) au sujet de la dichotomie de l'analytique et du synthétique. Plus précisément, nous pouvons en conclure que la raison pour laquelle Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) refusait d'abandonner une telle distinction était, à son tour, double. Premièrement, comme nous l'avons déjà remarqué, il estimait nécessaire de tracer une ligne de démarcation entre la logique et les mathématiques analytiques, d'une part, et les sciences empiriques, aussi mathématisées qu'elles puissent être, d'autre part. Deuxièmement, contrairement à Quine (1951, 1953), Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) mettait davantage l'accent sur le fait que le langage de la science posséderait ce que Hempel (1950a) appelait un « surplus de signification » (« *surplus* »

meaning ») et qui consisterait en ceci que « la signification d'un énoncé qui est formulé dans le langage de la science se reflète dans la totalité des relations logiques (aussi bien d'implication que de confirmation) qu'il entretient avec tous les autres énoncés de ce même langage [*'is reflected in the totality of its logical relationships (those of entailment as well as those of confirmation) to all other sentences of that language'*] » (Hempel 1950a, p. 172), si bien qu'elle ne saurait se réduire aux seules relations logiques et épistémologiques qui relient l'énoncé en question à l'expérience empirique (actuelle ou possible). Autrement dit, nous pouvons en conclure que, alors que Quine (1951, 1953) concevait la signification des énoncés scientifiques comme consistant, pour reprendre la métaphore du champ de forces, dans une réaction dynamique du langage des sciences au bombardement de stimulations sensorielles que subissent les êtres humains, Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) défendait une vision beaucoup plus « proactive », pour ainsi dire, de la signification théorique comme construction logique capable de dégager la structure sous-jacente à tel ou tel domaine de l'expérience sensible. Une telle interprétation de la position de Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) au sujet de l'importance de la dichotomie de l'analytique et du synthétique a l'avantage d'inscrire cette dernière, encore une fois, dans la droite ligne de la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne, c'est-à-dire d'une conception du monde d'après laquelle il existerait une certaine « forme d'ordre » (« *Ordnungsform* ») (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 115) qui constituerait un « trait tout à fait général de l'expérience [*'ein ganz allgemeiner...Zug der Erfahrung'*] sur lequel reposent...la possibilité d'une physique intersensorielle...et celle d'une physique intersubjective [*'die Möglichkeit einer intersensualen Physik beruht... bzw. die Möglichkeit einer intersubjektiven Physik'*] » (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 340).

En conséquence, ce serait précisément une telle forme d'ordre qui constituerait la « structure » (« *Struktur* ») de la réalité physique telle qu'elle se manifeste au travers de l'expérience, non pas en tant que reflet de l'« essence » (« *Wesen* ») des choses, ni en tant que construction de la pensée pure (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 115), mais, pour reprendre les mots mêmes de Carnap (1932b), comme « circonstance heureuse...qui n'est en rien logiquement nécessaire, mais empirique » (« *glücklicher Umstand, der durchaus nicht logisch notwendig ist, sondern empirisch vorliegt* ») (Carnap 1932b ; Bonnet & Wagner 2006, p. 337-338). Dans une telle perspective, la « description scientifique » (« *wissenschaftliche Beschreibung* ») de la réalité (Carnap *et al.* 1929 ; Soulez *et al.* 2010, p. 115) consisterait, justement, à tirer profit de cette heureuse circonstance pour reconstruire la structure propre à l'expérience empirique, sous la forme d'un système d'énoncés et de concepts, en se servant d'énoncés analytiques (non seulement de nature logique et mathématique, mais également de nature proprement scientifique) afin de bâtir l'échafaudage de relations formelles

qui sert de support à un tel système. Nous pouvons donc en déduire que c'est précisément pour une telle raison que Carnap (1952, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) estimait que le but de la reconstruction formelle de la structure et du contenu des théories scientifiques devait consister à identifier trois composantes fondamentales : premièrement, une composante analytique, qui constituerait la structure logique de la théorie en question, en tant que « totalité des relations logiques (aussi bien d'implication que de confirmation) » que les énoncés dont elle se constitue entretiennent les uns avec les autres, et qui coïnciderait, par conséquent, avec son « surplus de signification », c'est-à-dire avec son contenu proprement conceptuel ; deuxièmement, une composante synthétique, qui constituerait non seulement le contenu empirique de la théorie que l'on est en train de reconstruire, mais également la manière dont cette dernière est à même de restituer la structure qui est propre à l'expérience empirique ; troisièmement, la manière dont cette composante analytique et cette composante synthétique s'articulent l'une à l'autre, c'est-à-dire la relation qui existe entre le contenu conceptuel et le contenu empirique de la théorie en question, ainsi qu'entre la structure logique de cette dernière et la structure, pour ainsi dire, « phénoménique » qui caractérise l'expérience empirique en tant que telle. Cela dit, de quelle manière serait-il possible de séparer ces trois composantes, et notamment d'isoler la composante analytique des théories scientifiques, au sens large du terme ? Ne vaudrait-il pas mieux adopter une conception, pour ainsi dire, « holiste » de la structure et du contenu de ces mêmes théories, à côté d'une vision « dualiste » du langage formel, partiellement interprété, que l'on peut utiliser pour les reconstruire ? En quoi pourrait-on replacer une telle conception holiste dans le contexte plus large de la conception classique des théories scientifiques ?

Afin d'affronter de telles problématiques, nous verrons, dans un premier temps (3.1.1), que la première réponse que Carnap (1952, 1966) ait apportée à la question de savoir de quelle manière l'on pourrait isoler les composantes analytiques des théories scientifiques, en tant que systèmes d'énoncés, a consisté à formuler le concept de « postulat-A » (« *A-postulate* »), ou « postulat de signification » (« *meaning postulate* »). Il s'agit, plus précisément, d'une classe de postulats dont la fonction consiste à définir, de manière analytique et implicite, les relations logiques que l'on peut établir entre des termes descriptifs, afin de mettre au jour la manière dont ces derniers contribuent à définir, mutuellement, leurs significations respectives. Néanmoins, comme l'expliquait Carnap (1952, 1966) lui-même, de tels postulats ne s'appliquent qu'aux langages formels de nature observationnelle, puisque les termes descriptifs que contiennent les langages théoriques désignent des concepts au caractère protéiforme, dont il serait impossible de donner une définition exhaustive par l'intermédiaire d'une classe d'énoncés de la même forme logique que les postulats-A. Mais est-ce que cela signifierait qu'il faudrait abandonner complètement l'idée qu'il serait possible d'identifier les composantes analytiques de tel ou tel langage théorique ? Il se trouve, en effet, que Carnap (1936b,

1937) avait précédemment défini une autre classe d'énoncés que l'on pourrait considérer comme étant de possibles candidats au rôle de postulats de signification pour les termes d'un langage formel de nature théorique, à savoir les « énoncés de réduction » (« *reduction statements* »), et plus précisément les « énoncés de réduction bilatéraux » (« *bilateral reduction statements* »). Il en découle que, afin de répondre à la question de savoir s'il serait possible de distinguer les trois composantes des théories scientifiques, toujours en tant que systèmes d'énoncés, que nous venons de mentionner, il est nécessaire d'analyser les critiques qui ont été adressées au concept même d'énoncé de réduction, et notamment celles de Carl G. Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965). C'est précisément à partir de telles critiques qu'il est possible, en effet, de comprendre en quoi consistent les limites des énoncés de réduction en tant que postulats de signification pour les termes théoriques. Cela dit, dans quel sens pourrait-on considérer les énoncés de réduction, et notamment les énoncés de réduction bilatéraux, comme étant de véritables définitions implicites et analytiques, qui permettraient d'introduire de nouveaux termes théoriques dans le cadre d'un langage formel donné ? C'est pour répondre à cette autre question que, dans un second temps (3.1.2), nous montrerons que, si l'on adopte la caractérisation formelle du concept même de « définition » qu'a proposée Alfred Tarski (1935b, 1956), il est possible de tirer deux conclusions majeures au sujet des énoncés de réduction en tant que postulats de signification, qui sont l'une de nature positive et l'autre de nature négative. D'une part, il est possible d'en conclure, en effet, que les énoncés de réduction constituent de véritables définitions, alors que, d'autre part, l'on peut également montrer en quoi ces mêmes énoncés ne constituent pas de véritables postulats, car la signification qu'ils attribuent aux termes qu'ils définissent dépend d'un contexte théorique et empirique plus large. C'est pourquoi il est utile de considérer la solution alternative aux postulats de signification théorique qu'a fini par proposer Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) lui-même et qui consiste à envisager l'interprétation (partielle) des termes théoriques comme étant le fait d'un système d'énoncés qui sont de formes logiques diverses entre elles – dont également les postulats de signification de Carnap (1952) – appelé « système interprétatif » (« *interpretative system* »). L'analyse d'une telle manière de concevoir l'interprétation (partielle) des termes théoriques qui figurent dans les théories scientifiques, en tant que systèmes d'énoncés, nous permettra, par la suite, d'identifier une vision particulière de la conception classique, que nous qualifierons de « holiste », en ceci qu'elle repose, précisément, sur le présupposé qu'il faudrait considérer les théories scientifiques et les systèmes d'énoncés dont on peut se servir pour les interpréter comme étant des « blocs » uniques, d'où l'on peut en conclure qu'il serait inutile de « sauver » la distinction traditionnelle entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques. C'est précisément une telle vision de la conception classique qu'a fini par adopter Hempel (1963). De plus, bien que cette dernière soit en contradiction avec l'accent mis par Carnap

(1958, 1966) sur le rôle essentiel que jouerait la dichotomie de l'analytique et du synthétique dans la formation de la connaissance scientifique, Hempel (1963) affirmait qu'elle s'inscrivait dans la droite ligne de la conception carnapienne de la reconstruction formelle du savoir scientifique. Cela dit, en quoi et dans quelle mesure le maintien d'un tel propos serait-il justifié ?

3.1.1 Les postulats de signification face au lien étroit entre le caractère logique des termes théoriques et leur caractère méthodologique : serait-il impossible de définir le concept d'analyticité relativement aux langages des sciences empiriques ?

La première réponse que Carnap (1952) ait apportée aux objections que Quine (1951, 1953) avait soulevées contre le concept d'analyticité, notamment au sens de « vérité fondée sur la signification » (« *truth based upon meaning* »), est donc contenue dans un article, datant de 1952, qui vise précisément à « décrire une manière d'explicitier » (« *to describe a way of explicating* ») ce même concept « dans le cadre d'un système sémantique » (« *in the framework of a semantical system* ») et par l'intermédiaire de ce que Carnap (1952) appelait des « postulats de signification » (« *meaning postulates* ») (Carnap 1952 ; 1997, p. 336), ou encore des « postulats-A » (« *A-postulates* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 253). Par « système sémantique », Carnap (1952) entend ici, tout simplement, un langage formel L qui est associé non seulement à un ensemble de règles syntaxiques, mais également à un ensemble de règles sémantiques. Plus précisément, le système sémantique dont il est question dans cet article contient les constantes logiques usuelles (à savoir les connecteurs de la logique propositionnelle et les quantificateurs existentiel et universel), des constantes d'individus (« a », « b », etc.), qui sont donc de nature descriptive, des variables qui correspondent à ces mêmes constantes, ainsi que « des prédicats descriptifs primitifs » (« *primitive descriptive predicates* ») tels que, par exemple, les prédicats « Cx » et « Mx », auxquels nous pouvons attribuer, intuitivement, les significations suivantes : « célibataire » (« *bachelor* ») et « marié » (« *married* ») (Carnap 1952 ; 1997, p. 337). Il comporte, en outre, les règles sémantiques qui permettent d'assigner aux constantes logiques leur interprétation habituelle, ainsi que des règles qui permettent de définir le concept de « vérité-L » pour les énoncés « S_i » du langage L qui contiennent également des signes descriptifs. Un exemple en est la règle sémantique d'après laquelle « S_i est satisfait par toutes les valeurs des constantes descriptives qui y figurent » (« *S_i is satisfied by all values of the descriptive constants occurring* »), pourvu que L contienne également « des règles pour les domaines de valeurs de toutes les variables » (« *rules for the range of values of all variables* »), ainsi que « des règles analogues pour les domaines de valeurs de toutes les constantes descriptives » (« *analogous rules for the range*

of values for all descriptive constants») (Carnap 1952 ; 1997, p. 338)¹⁹⁴, afin que l'on puisse remplacer, *salva veritate*, des constantes par des variables, ou inversement. Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, une fois que l'on a défini le concept de vérité-L, l'on peut également définir les concepts de « fausseté-L » (un énoncé « S_i » est L-faux si et seulement si sa négation, « $\sim S_i$ », est L-vraie), de « L-implication » (« S_i » L-implique « S_j » si et seulement si l'énoncé « $S_i \supset S_j$ » est L-vrai) et de « L-équivalence » (« S_i » est L-équivalent à « S_j » si et seulement si l'énoncé « $S_i \equiv S_j$ » est L-vrai). En conséquence, c'est précisément sur la base du concept de vérité-L, ainsi défini, que Carnap (1952) tâche d'expliciter celui de « vérité-A », en prenant, comme exemple, l'énoncé « tous les célibataires ne sont pas mariés ». Pour ce faire, il traduit l'énoncé en question par la formule « $(x)(Cx \supset \sim Mx)$ », qu'il pose, justement, comme postulat de signification, ou postulat-A, pour le système L . Il en découle que, indépendamment des interprétations attendues des signes descriptifs primitifs qui y figurent, un postulat de signification est un énoncé qui exprime des relations purement formelles que l'on suppose exister entre ces dernières. Cela nous montre, ainsi, qu'il s'agit bien d'un postulat, ou d'un axiome, au sens « hilbertien » du terme, car sa fonction ne consiste pas à nous apporter de nouvelles informations factuelles, mais seulement à définir implicitement et analytiquement les significations respectives des mots, ou des signes, descriptifs qui y figurent, c'est-à-dire à définir de telles significations en fonction des relations purement formelles que l'on peut établir entre ces dernières au moyen des principes et des termes qui relèvent de la logique et des mathématiques analytiques. Dans le cas du postulat « $(x)(Cx \supset \sim Mx)$ », par exemple, la fonction de cet axiome consiste à définir les significations respectives des prédicats descriptifs

¹⁹⁴ Plus précisément, Carnap (1952) fournit trois autres définitions possibles du concept de vérité-L, qui sont toutes équivalentes à celle que nous venons de citer : « La formule logique ouverte [*'open logical formula'*] correspondant à S_i [par exemple, ' $fx \vee \sim fx$ '] est universellement valide [*'universally valid'*] (i.e. satisfaite par toutes les valeurs de ses variables libres [*'satisfied by all values of the free variables'*]) » ; « L'affirmation logique universelle [*'universal logical statement'*] correspondant à S_i [par exemple ' $(f)(x)(fx \vee \sim fx)$ '] est vraie. (On présuppose ici que L contient des variables avec quantificateurs correspondant à toutes les constantes descriptives) » ; « S_i vaut dans toutes les descriptions d'état [*'state-descriptions'*]. (Une description d'état est une conjonction contenant, pour tout énoncé atomique, soit cet énoncé, soit sa négation, mais pas les deux à la fois, et aucun autre énoncé. On présuppose ici que L contient des constantes pour toutes les valeurs de ses variables et, en particulier, des constantes d'individu pour tous les individus de l'univers du discours [*'all individuals of the universe of discourse'*]) » (Carnap 1952 ; 1997, p. 337-338). Il en découle que les quatre définitions que donne ici Carnap (1952) tiennent toutes au fait qu'un énoncé que l'on peut considérer comme étant L-vrai dans L est un énoncé qui est vrai de tous les individus qui constituent l'univers du discours associé au langage formel en question. La première définition que nous avons citée n'est rien d'autre que la manière la plus économique d'exprimer une telle condition, vu qu'elle ne présuppose rien d'autre qu'un ensemble de règles permettant d'utiliser les variables et les constantes de L .

« Cx » et « Mx » en établissant, entre ces dernières, une relation d'incompatibilité mutuelle (Carnap 1952 ; 1997, p. 339). C'est pourquoi nous pouvons en conclure que, dans tout système sémantique qui comporte un tel postulat, un énoncé de la forme « $Cx \wedge Mx$ » doit nécessairement être considéré comme étant contradictoire en raison des significations des signes descriptifs qui y figurent, c'est-à-dire comme étant A-faux, alors qu'un énoncé de la forme « $Cx \wedge \sim Mx$ » doit être considéré comme étant A-vrai. Plus généralement, Carnap (1952) se sert des postulats de signification pour expliciter le concept de vérité-A en tant que vérité-L par rapport à ces derniers et, pour ce faire, il définit « le terme 'L-vrai relativement [à la conjonction d'une classe de postulats de signification] P ' [*L-true with respect to P*]' » de la manière suivante : « un énoncé S_i de L est L-vrai relativement à $P \stackrel{\text{def}}{=} S_i$ est L-impliqué [*L-implied*] par P dans L » (Carnap 1952 ; 1997, p. 340), si bien que l'on peut également en conclure que « S_i L-implique S_j relativement à P » dans L si et seulement si « P L-implique $S_i \supset S_j$ », toujours dans L (Carnap 1952 ; 1997, p. 341)¹⁹⁵. En conséquence, soit L' le système sémantique que l'on peut obtenir en ajoutant au système L la classe de postulats de signification dont la conjonction est P et soit le concept de « vérité-L dans L' » défini comme suit : « un énoncé S_i est L-vrai dans $L' \stackrel{\text{def}}{=} S_i$ est L-impliqué par P dans L ». Il s'ensuit que le concept de vérité-L dans L' constitue, justement, un « *explicatum* » du concept de « vérité-A dans L » (Carnap 1952 ; 1997, p. 341). Une question subsiste, cependant : comment formuler des postulats de signification, ou postulats-A, qui soient à même de couvrir entièrement ce qu'on pourrait appeler le « champ sémantique » que l'on peut associer, dans tel ou tel cadre sémantique, à des termes comme « célibataire », « marié », ou encore « pivolet rouge » et « température » ?

La réponse que Carnap (1952, 1966) a apportée à une telle question est, encore une fois, de nature pragmatique, en ceci qu'elle tient au niveau de précision que l'on est prêt à accepter quant à la signification de tel ou tel mot lorsqu'on le définit dans un cadre sémantique bien déterminé, c'est-à-dire celui d'un certain système sémantique L , au moyen d'une classe de postulats-A. En effet, comme le rappelle Carnap (1966) lui-même dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, l'approche qu'il défend consiste à étudier le problème de l'analyticité « en se référant à un langage d'observation construit de toutes pièces à partir de règles précises » (« *with respect to an artificial observational language that can be constructed by laying down precise rules* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 253), y compris, justement, d'éventuels postulats de signification, ou postulats-A. Il en découle que, lorsqu'il est question de formuler ces derniers, l'on peut toujours faire appel aux principes de tolérance

¹⁹⁵ Encore une fois, Carnap (1952) fournit trois autres définitions du concept de « L-implication relativement à P », qui sont, néanmoins, toutes équivalentes à la première : « $P \supset (S_i \supset S_j)$ est L-vrai » ; « $P \wedge (S_i \supset S_j)$ est L-vrai » ; « $P \wedge S_i$ L-implique S_j » (Carnap 1952 ; 1997, p. 341).

syntactique et de tolérance sémantique, pourvu que les postulats-A que l'on souhaite introduire dans le langage en question soient clairs et qu'ils soient en mesure de « mettre en évidence les relations de signification qui existent entre certains mots » (« *meaning relations between certain words must be made clear* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 253), comme, pour revenir à l'exemple que nous avons fait plus haut, la relation d'incompatibilité mutuelle entre les mots « célibataire » et « marié », c'est-à-dire entre les prédicats « Cx » et « Mx ». Il s'ensuit que, à moins que cela ne soit pas strictement nécessaire au vu de l'usage que l'on souhaite faire du langage formel que l'on est en train de construire¹⁹⁶, il est toujours possible de s'épargner la peine de formuler des règles qui énumèrent, *in extenso*, toutes les propriétés qu'il faut attribuer, par exemple, à un terme comme « pivert à tête rouge » afin qu'on puisse le définir relativement aux termes « animal » et « oiseau ». Pour ce faire, il suffit, justement, d'introduire dans le langage en question des postulats de signification, que l'on peut exprimer sous la forme d'énoncés universels et qui permettent, comme nous l'avons vu plus haut, de définir implicitement les termes qui y figurent, tels que, par exemple, les postulats « Tous les oiseaux sont des animaux » (« *All birds are animals* ») et « Tous les piverts à tête rouge sont des oiseaux » (« *All red-headed woodpeckers are birds* »). La raison en est que des énoncés d'une telle forme constituent, tout de même, « une base suffisante pour distinguer [*a sufficient basis for making the distinction*] [toujours dans le langage formel en question] les énoncés analytiques [qui contiennent le terme 'pivert à tête rouge'] des énoncés synthétiques [qui contiennent ce même terme] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 253-254), ce qui est, par conséquent, la fonction que Carnap (1952, 1966) souhaitait attribuer aux postulats de signification. En résumé, l'introduction de telle ou telle classe de postulats de signification dans le cadre d'un langage formel donné se justifie toujours par la nécessité de faire un arbitrage entre concision et précision, puisque « plus la liste des postulats-A est précise, plus il est aisé de distinguer, dans notre langage, les énoncés analytiques et les énoncés synthétiques » (« *the more precise the list of A-postulates is made, the more precise a distinction can be made between analytic and synthetic sentences in our language* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 254), alors que, plus ces mêmes règles de signification demeureront vagues, plus le caractère logique des énoncés du langage formel que l'on aura construit sera flou. D'ailleurs, c'est précisément pour une telle raison que, comme l'admettait Carnap (1966) lui-même, la méthode des postulats de signification est beaucoup mieux adaptée à un « langage d'observation » (« *observation language* ») qu'à un langage théorique (« *theoretical language* »), c'est-à-dire à un langage formel tel que le sous-langage L_T que nous avons

¹⁹⁶ Pour revenir à l'exemple du pivert à tête rouge, si la fonction attendue du langage que l'on est en train de construire consiste à élucider et à trancher des questions empiriques relatives à l'ornithologie, il sera nécessaire de formuler des postulats de signification qui seront beaucoup plus pointus et plus exhaustifs que ceux qu'on aurait pu formuler si la nature (pragmatique) du langage en question avait été différente.

défini dans le chapitre précédent. Comme nous l'avons déjà évoqué, les termes dont se compose le vocabulaire d'un langage tel que L_T ne sont, en effet, interprétables que de manière indirecte et incomplète, si bien qu'il n'est jamais possible d'effectuer un arbitrage entre précision et concision lorsqu'il s'agit d'en déterminer les significations respectives. Pour ne faire qu'un exemple, considérons le terme « température » en tant que terme théorique. Comme nous l'avons remarqué plus haut, dans le cadre théorique de la mécanique statistique qui s'est développé à partir de la théorie cinétique des gaz, il est possible d'établir un rapport de synonymie entre le terme « température (absolue) d'un système thermodynamique à l'état d'équilibre macroscopique » et le terme « énergie cinétique moyenne de translation des particules qui constituent les micro-états de ce même système ». Mais est-ce qu'un tel rapport de synonymie nous permettrait-il de donner une définition exhaustive du terme « température » en tant que terme théorique du langage de la physique ? Plus généralement, en quoi serait-il possible d'identifier une classe de termes théoriques du langage des sciences pour lesquels on pourrait fournir des définitions exhaustives au moyen de postulats de signification, ce qui nous permettrait, par le même biais, de distinguer les composantes analytiques des théories empiriques de leurs composantes synthétiques à partir des termes qu'elles contiennent ?

Si l'on se limite à prendre en considération les postulats de signification tels que les définit Carnap (1952, 1966) dans son article éponyme, datant de 1952, et dans *Les Fondements philosophiques de la physique*, la réponse que l'on peut apporter à ces deux questions est nécessairement négative. Pour s'en convaincre, il suffit de prendre en considération une autre définition possible de la température en tant que fonction d'état (macroscopique) d'un système thermodynamique, comme, par exemple, un gaz. Il s'agit, plus précisément, de la définition que l'on peut déduire de « l'équation d'état » (« *equation of state* ») pour les gaz parfaits, c'est-à-dire de l'équation qui décrit, justement, l'état macroscopique d'un gaz parfait en tant que système thermodynamique idéalisé. Pour ce faire, une telle équation relie entre elles trois grandeurs particulières, qui sont la pression (p), le volume (V) et la température (T) :

$$pV = nRT$$

où n est le nombre de moles que contient l'échantillon de gaz en question et R est une constante de proportionnalité fondamentale et universelle que l'on appelle généralement « constante molaire des gaz » (« *molar gas constant* ») (Gallavotti 1999, p. 70). L'équation d'état pour les gaz parfaits nous permet donc d'en conclure que

$$T = \frac{pV}{nR} \rightarrow T \propto pV.$$

Cette définition du terme « température » est, en conséquence, d'une nature profondément différente de celle de la définition que nous en avons donnée plus haut, du moins si on la considère dans le contexte du cadre théorique dans lequel a été formulée l'équation d'où nous l'avons déduite, c'est-à-dire le cadre de la « thermodynamique classique » (« *classical thermodynamics* »). En effet, bien qu'il soit toujours possible d'exprimer non seulement la température, mais également la pression et le volume qui caractérisent un système thermodynamique donné, en fonction des « propriétés microscopiques » (« *microscopic properties* ») de ce dernier, et donc quoiqu'il soit toujours possible de déduire l'équation d'état de ce même système à partir des modèles de la mécanique statistique¹⁹⁷,

¹⁹⁷ La synthèse de la mécanique statistique et de la thermodynamique classique repose, en effet, sur le présupposé de « l'existence d'ensembles statistiques (c'est-à-dire de familles de distributions de probabilités stationnaires sur un espace des phases) qui fournissent des modèles mécaniques pour la thermodynamique » (« *the existence of statistical ensembles (i.e. a family of stationary probability distributions on phase space) that provide mechanical models of thermodynamics* ») (Gallavotti 1999, p. 22), dont la vérité a été prouvée par Ludwig Boltzmann (1884). Plus précisément, Boltzmann (1884) a réussi à démontrer l'existence d'un ensemble statistique particulier, appelé « ensemble microcanonique » (« *microcanonical ensemble* ») ou « ergode » (« *ergode* »), qui est « orthodique » (« *orthodic* ») (Gallavotti 1999, p. 22), c'est-à-dire qui définit un modèle microscopique pour la thermodynamique où la température (absolue) d'un système donné est, justement, proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne de translation des particules qui en constituent les différents micro-états. L'ensemble microcanonique de Boltzmann (1884) n'est rien d'autre qu'une « collection \mathcal{E} de distributions stationnaires μ [*'collection...of stationary distributions'*] qui sont définies par deux paramètres U = énergie totale [du système] et V = volume du système », de telle sorte que

$$\mu(\Delta) = \begin{cases} 1/\mathcal{N}(U, V), & U - DE \leq E(\Delta) \leq U \\ 0 & , \quad \text{autrement} \end{cases}$$

(Gallavotti 1999, p. 22). Dans le cadre de cette définition, Δ est l'une des cellules de dimensions égales, et en nombre fini, dans lesquelles on peut subdiviser l'espace des phases qui représente les possibles micro-états du système en question et qui correspondent, par conséquent, à différents ensembles de micro-états de ce même système que l'on peut considérer comme étant équivalents à une certaine marge d'erreur (affectant les mesures des quantités de mouvement et des positions des particules qui les constituent) près, $\mu(\Delta)$ est une fonction qui mesure la probabilité qu'une certaine cellule Δ corresponde à un ensemble de micro-états qui finira par se réaliser, $E(\Delta)$ est l'énergie totale de la cellule en question, DE est un paramètre arbitraire qui dépend généralement du volume du système (V) et qui représente la marge d'erreur, macroscopiquement négligeable, avec laquelle on peut mesurer la valeur de l'énergie totale de ce dernier (U), alors que $\mathcal{N}(U, V) = \sum_{U-DE \leq E(\Delta) \leq U} 1$, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une constante de normalisation égale au nombre de cellules Δ dont l'énergie totale $E(\Delta)$ appartient à l'intervalle $(U - DE, U)$, et qui ont donc « la 'même énergie' d'un point de vue macroscopique » (« *the 'same energy' from a macroscopic point of view* »), vu que la quantité DE est, comme nous venons de le préciser, « macroscopiquement négligeable » (« *macroscopically negligible* ») (Gallavotti 1999, p. 22). En conséquence, c'est précisément le modèle mécanique que fournit l'ensemble microcanonique qui nous permet d'exprimer

les équations d'état de la thermodynamique classique sont de « caractère phénoménologique » (« *phenomenological character* »). Cela signifie, tout simplement, qu'elles expriment des relations « qui ne peuvent être déduites que par l'intermédiaire d'expériences [empiriques] » (« *that can only be deduced by means of experiments* ») (Gallavotti 1999, p. 24), mais que l'on peut tout de même considérer comme étant analytiques, en ceci qu'elles ne nous renseignent pas sur la réalité en tant que telle, mais exclusivement sur les rapports formels qui existent entre les significations empiriques des termes descriptifs qui apparaissent dans ces mêmes équations. Il en découle que ces deux définitions mettent en avant autant de facettes complémentaires de la signification du mot « température » en tant que terme du langage de la physique. Elles correspondent, en effet, à autant de fonctions épistémologiques que joue le concept qui est associé à un tel mot dans le cadre de la synthèse de la thermodynamique classique et de la mécanique statistique, ou plus précisément dans le contexte de la reconstruction de la première sur les fondements de la seconde, si bien que l'on pourrait distinguer deux concepts de température, et donc deux significations du terme qui y est associé : d'une part, la « température₁ », c'est-à-dire la température définie en tant qu'énergie cinétique moyenne de translation des particules qui constituent les micro-états du système thermodynamique en question ; d'autre part, la « température₂ », c'est-à-dire la température définie sur la base de la relation phénoménologique qu'exprime l'équation d'état $pV = nRT$. Nous pouvons donc en conclure que la « température₁ » sert de « pont conceptuel » entre les descriptions des micro-états d'un système

les fonctions d'état de la thermodynamique classique sous la forme de fonctions de telle ou telle distribution stationnaire, μ , des ensembles de micro-états que constituent les différentes cellules de l'espace des phases du système en question. Pour ce faire, la seule condition qu'il est nécessaire de poser est celle du passage à la « limite thermodynamique » (« *thermodynamic limit* »), c'est-à-dire la condition que « $V \rightarrow \infty$, $U \rightarrow \infty$ et $N \rightarrow \infty$ », de telle sorte que l'on puisse considérer « $u = \frac{U}{N}$, $v = \frac{V}{N}$ » comme étant des valeurs constantes qui correspondent, respectivement, à l'« énergie spécifique » (« *specific energy* ») et au « volume spécifique » (« *specific volume* ») de ce même système (Gallavotti 1999, p. 23). Ce faisant, l'on peut donc définir la température (absolue) (T), l'entropie (S) et la pression (p), en tant que fonctions d'état macroscopiques, de la manière suivante : $T = \frac{2T(\mu)}{3k_B N}$, $S = \frac{S(\mu)}{N}$ et $p = P(\mu)$ (Gallavotti 1999, p. 23), où $T(\mu) = \sum_{\Delta} \mu(\Delta) K(\Delta)$ est l'énergie cinétique moyenne de translation des particules dont se compose le système en question, $P(\mu) = \sum_{\Delta} \mu(\Delta) P(\Delta)$ est la pression, pour ainsi dire, « microscopique » qui est due aux chocs de ces mêmes particules (Gallavotti 1999, p. 20) et $S(\mu) = k_B \log \mathcal{N}(U, V)$ est « la relation bien connue de Boltzmann [(1877)] qui exprime l'entropie en tant que grandeur proportionnelle au logarithme du nombre de micro-états possibles [qui sont associés à une certaine valeur d'énergie totale du système, égale à U , et à un certain volume total du système, égal à V] » (« *the well-known Boltzmann's relation expressing entropy as proportional to the logarithm of the number of possible microscopic states with given energy and volume* ») (Gallavotti 1999, p. 66). C'est en procédant ainsi que l'on peut donc exprimer l'équation d'état pour les gaz parfaits sous la forme d'une équation qui porte sur des grandeurs microscopiques, que l'on peut définir à l'aide des modèles de la mécanique statistique.

thermodynamique donné que fournissent les modèles de la mécanique statistique et les descriptions des états macroscopiques de ce même système que l'on peut formuler au moyen des grandeurs de la thermodynamique classique, alors que la « température₂ » sert de « pont conceptuel » entre le versant théorique de la thermodynamique classique et son versant expérimental, puisqu'elle exprime une relation entre grandeurs physiques qui est expérimentalement déterminable. Autrement dit, nous pouvons en conclure que le concept de « température₁ » exprime la signification logique que l'on pourrait attribuer au terme « température », tel qu'il est défini dans le contexte des modèles mathématiques de la mécanique statistique, alors que le concept de « température₂ » exprime la signification empirique de ce même terme, en la mettant en relation avec les significations empiriques des termes « pression », « volume », « nombre de moles » et « constante molaire des gaz ». De plus, les différentes significations du terme « température » que l'on peut associer, respectivement, à ces deux concepts dépendent des cadres plus larges, de nature théorique ou expérimentale, dans lesquels ils se situent. En ce qui concerne le concept de température₁, la définition que nous en avons donnée plus haut dépend, justement, des modèles et des principes fondamentaux dont se constitue le cadre théorique de la synthèse entre thermodynamique et mécanique statistique. Quant au concept de température₂, la définition que nous en avons donnée est une définition phénoménologique, si bien qu'elle dépend des différentes méthodes expérimentales dont on peut se servir pour mesurer la valeur des grandeurs observables qui y figurent. Comme l'observait Carnap (Psillos & Carnap 2000) lui-même, nous pouvons identifier, en effet, une procédure qui nous permet de « construire un thermomètre et de construire une échelle de mesure correspondante » (« *constructing a thermometer and constructing its scale* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 161), si bien que nous pouvons mesurer, par exemple, la température d'un certain liquide en y immergeant le thermomètre ainsi construit et en lisant la valeur qui est affichée sur l'échelle correspondante. Une telle procédure nous fournit, ainsi, une « définition opérationnelle » (« *operational definition* ») du concept de température en tant que concept phénoménologique, mais il s'agit d'une définition que l'on peut utiliser seulement dans un nombre limité de conditions expérimentales, puisque, pour ne faire qu'un exemple, « un thermomètre ordinaire ne fonctionne que dans un intervalle d'échelle plutôt limitée [*in a rather limited interval of the scale*'] ; pour des températures trop basses, ou pour des températures trop élevées, nous devons utiliser des méthodes de mesure complètement différentes » (Psillos & Carnap 2000, p. 161). Cet exemple témoigne, par conséquent, du fait que le recours à des définitions implicites et analytiques – au moyen de postulats de signification – des termes théoriques qui relèvent des sciences empiriques se heurte toujours aux problèmes que posent les liens étroits qui existent entre le caractère logique de ces mêmes termes et leur caractère méthodologique, ou épistémologique. En effet, ce sont précisément de tels liens qui font en sorte que leurs significations respectives demeurent toujours

quelque peu indéterminées. Mais faut-il donc en conclure que toute tentative d'identifier des classes d'énoncés qui puissent remplir la fonction de définitions analytiques, quoique partielles, de termes théoriques serait vouée à l'échec ?

Afin de répondre à cette question, il est utile d'analyser un autre type d'énoncés que l'on pourrait considérer comme étant de possibles candidats au rôle de postulats de signification, en tant que définitions analytiques, c'est-à-dire les énoncés de réduction par le biais desquels Carnap (1936b, 1937) a défini l'exigence empiriste de confirmabilité des énoncés où apparaissent des termes descriptifs de nature théorique, par réduction de ces derniers à des classes de prédicats observables ou réalisables, qu'il analyse dans *Testabilité et signification*. Pour ce faire, nous partirons des critiques que Carl G. Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) a soulevées précisément contre un tel critère de signification empirique, et qui ont contribué à faire en sorte que Carnap (1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) finisse par adopter une conception de l'interprétation partielle des termes théoriques comme fonction de la structure logique des théories scientifiques dans lesquelles ils apparaissent – et notamment de la structure syntaxique du langage formel dont on peut se servir pour reconstruire ces mêmes théories en tant que systèmes axiomatiques qui sont, à priori, dénués de toute interprétation – ainsi que de la manière dont on peut mettre en relation les énoncés de lois qui sont formulés dans un certain langage théorique et les énoncés qui sont formulés dans le langage d'observation correspondant, par l'intermédiaire d'un ensemble de règles de correspondance. Plus précisément, dans quatre articles consacrés aux problèmes logiques et méthodologiques qui sont liés, respectivement, aux « critères empiristes de signification cognitive » (« *empiricist criteria of cognitive significance* ») (Hempel 1950b, 1951, 1965), à une « appréciation logique » (« *logical appraisal* ») de la conception opérationnaliste des concepts scientifiques (Hempel 1954, 1965), ainsi qu'à « la logique de la construction des théories » (« *the logic of theory construction* ») (Hempel 1958, 1965)¹⁹⁸, ce dernier argue du fait que, tout en étant « parfaitement appropriés à la reconstruction de critères opérationnels pour l'application de tel ou tel terme théorique sous la forme de définitions partielles » (« *very well suited for the formulation of operational criteria of application as partial definitions* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 207), les énoncés de réduction, tels que les avait définis Carnap (1936b, 1937), ne seraient pas en mesure de « fournir un schéma général satisfaisant pour

¹⁹⁸ Il s'agit de quatre articles qui ont été publiés, une première fois, de manière indépendante, respectivement en 1950, en 1951, en 1954 et en 1958, mais dont on peut trouver la mouture finale, qui est précisément celle que nous citerons ici, dans *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science (Aspects de l'explication scientifique et autres essais de philosophie des sciences)* (Hempel 1965), paru en 1965. Les deux premiers articles, qui portaient tous les deux sur la question des critères empiristes de signification cognitive, ont, d'ailleurs, été fusionnés dans leur version finale.

l'interprétation partielle de termes théoriques » (« *provide a satisfactory general schema for the partial interpretation of theoretical terms* »). Toujours d'après ce qu'en écrivait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), cela dépendrait de leur « forme logique » (« *logical form* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 207), ce que Carnap (1956a) a, d'ailleurs, fini par reconnaître lui-même dans son article sur le caractère méthodologique des termes théoriques, datant de 1956¹⁹⁹. Les arguments que développe Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) dans ces quatre articles constituent, en conséquence, un élément important pour comprendre l'évolution de la conception carnapienne de la reconstruction du savoir scientifique comme construction de cadres linguistiques qui a abouti, en définitive, à la formulation de la conception classique des théories scientifiques. Mais en quoi consistent, par conséquent, les énoncés de réduction, tels que les définissait Carnap (1936b, 1937) ?

Très succinctement, et comme nous l'avons déjà rappelé dans le chapitre précédent, un énoncé de réduction est, dans sa forme la plus simple, un énoncé qui permet d'introduire un certain terme extra-logique « *Q* », notamment une constante de prédicat qui est supposée désigner une certaine propriété non directement observable ou réalisable (c'est-à-dire, encore une fois, testable) de tel ou tel objet, en fonction de deux autres prédicats, « *C* » et « *E* », qui renvoient, au contraire, à des propriétés d'objets qui sont soit directement observables ou testables, ou, du moins, dont on peut supposer que leur signification empirique soit déjà déterminée. Plus précisément, réduire le prédicat « *Q* » aux prédicats « *C* » et « *E* » signifie montrer en quoi ces derniers permettent d'exprimer, d'un point de vue purement logico-syntaxique, les « conditions d'application » (« *conditions for its application* »)

¹⁹⁹ « L'on a constaté que les formulations originaires du critère [de signification empirique pour les termes théoriques] était trop fortes et trop étroites [*'too strong and too narrow'*]. Par conséquent, pas à pas, l'on a introduit des formulations plus libérales [*'more liberal formulations'*]. Hempel [1950b, 1951] a donné un clair aperçu d'un tel développement dans son article. L'un de ces changements a consisté à remplacer le principe de vérifiabilité [*'the principle of verifiability'*] par l'exigence, plus faible, de confirmabilité ou de testabilité [*'the weaker requirement of confirmability or testability'*], telle que je l'ai formulée dans mon article [Carnap (1936b, 1937)]. À l'époque où je l'ai écrit, je croyais encore que l'on pouvait introduire tous les termes théoriques comme s'il s'agissait de termes de disposition [*'as disposition terms'*], sur la base de termes d'observation [*'on the basis of observation terms'*], soit par l'intermédiaire de définitions explicites [*'explicit definitions'*], soit par l'intermédiaire de ce que j'appelais des énoncés de réduction [*'reduction sentences'*], qui constituent un certain type de définitions conditionnelles [*'a kind of conditional definition'*]. Je pense aujourd'hui, en accord avec la plupart des empiristes, que le lien entre les termes d'observation et les termes de la science théorique [*'the connection between the observation terms and the terms of theoretical science'*] est bien plus indirect et plus faible [*'much more indirect and weak'*] qu'on ne le concevait soit dans les versions précédentes de ma propre définition [du critère de signification empirique], soit dans celle des opérationnalistes » (Carnap 1956a, p. 52-53). Toujours au sujet de la libéralisation de la conception empiriste des critères de signification empirique pour les termes théoriques, voir également Pierre Jacob (1980a) et François Schmitz (2009).

du premier (Carnap 1938)²⁰⁰. Un énoncé qui exprime les relations logiques qui existent entre ces différents types de prédicats de la manière suivante constitue, par conséquent, un exemple d'énoncé de réduction :

$$(x) Cx \supset (Qx \equiv Ex)$$

(Hempel 1958 ; 1965, p. 207) – où « \supset » est, ici, le signe qui représente l'implication logique. Carnap (1936b, 1937) appelait de tels énoncés « énoncés de réduction bilatéraux » (« *bilateral reduction statements* »), en ceci qu'ils comportent une réduction du prédicat « Q » au prédicat « E » au moyen d'une équivalence logique (« \equiv »), c'est-à-dire d'une implication bilatérale²⁰¹. Un énoncé de

²⁰⁰ « Si maintenant un certain terme x est tel que ses conditions d'application (dans l'usage qui en est fait au sein du langage de la science) [*the conditions for its application (as used in the language of science)*] peuvent être formulées à l'aide des termes $y, z, \text{etc.}$, nous appelons une telle formulation un *énoncé de réduction* [*reduction statement*] pour x en termes de $y, z, \text{etc.}$, et nous disons x *réductible* à $y, z, \text{etc.}$ [*x reducible to y, z, etc.*] Il peut y avoir plusieurs ensembles de conditions pour l'application de x [*several sets of conditions for the application of x*] ; par conséquent, x peut être réductible à $y, z, \text{etc.}$, et également à $u, v, \text{etc.}$, et peut-être à d'autres ensembles. Il peut même y avoir des cas de réductibilité mutuelle [*mutual reducibility*], par exemple lorsque chaque terme de l'ensemble $x_1, x_2, \text{etc.}$, est réductible à $y_1, y_2, \text{etc.}$, et, d'un autre côté, chaque terme de l'ensemble $y_1, y_2, \text{etc.}$, est réductible à $x_1, x_2, \text{etc.}$ » (Carnap 1938 ; Bouveresse 2012, p. 170).

²⁰¹ Les énoncés de réduction bilatéraux ne constituent, cependant, qu'une forme particulièrement concise d'énoncés de réduction. D'une manière plus générale, comme l'écrit Carnap (1936b, 1937) lui-même, lorsque l'on souhaite introduire un prédicat théorique « Q_3 » dans un certain langage empiriste et physicaliste, l'on peut formuler « une paire d'énoncés [*a pair of sentences*] [universels] de la forme suivante :

$$(R_1) \quad Q_1 \supset (Q_2 \supset Q_3)$$

$$(R_2) \quad Q_4 \supset (Q_5 \supset \sim Q_3)$$

Ici ' Q_1 ' et ' Q_4 ' peuvent décrire des conditions expérimentales [*experimental conditions*] que nous devons remplir afin de déterminer si un certain point spatio-temporel b a ou non la propriété Q_3 [*to find out whether or not a certain space-time-point b has the property Q3*], c'est-à-dire si ' $Q_3(b)$ ' ou ' $\sim Q_3(b)$ ' est vrai. ' Q_2 ' et ' Q_5 ' peuvent décrire des résultats possibles des expériences [*possible results of the experiments*]. ' R_1 ' signifie alors : si nous réalisons la condition expérimentale ' Q_1 ', alors, si nous trouvons le résultat ' Q_2 ', le point a la propriété ' Q_3 '. D'après ' R_1 ', ' $Q_3(b)$ ' suit de ' $Q_1(b)$ ' et ' $Q_2(b)$ '. ' R_2 ' signifie : si nous satisfaisons la condition ' Q_4 ' et trouvons alors ' Q_5 ', le point n'a pas la propriété ' Q_3 '. D'après ' R_2 ', ' $\sim Q_3(b)$ ' suit de ' $Q_4(b)$ ' et ' $Q_5(b)$ '. Nous voyons que les énoncés ' R_1 ' et ' R_2 ' nous disent comment nous pouvons déterminer si le prédicat ' Q_3 ' doit ou non être attribué à un certain point [*how we may determine whether or not the predicate 'Q3' is to be attributed to a certain point*], pourvu que nous soyons capables de déterminer si les quatre prédicats ' Q_1 ', ' Q_2 ', ' Q_4 ' et ' Q_5 ' doivent ou non lui être attribués » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 83). Il en découle que la fonction de ces mêmes énoncés consiste, précisément, à déterminer les conditions d'application du prédicat « Q_3 » en fonction des quatre prédicats « Q_1 », « Q_2 », « Q_4 » et « Q_5 », si bien que Carnap (1936b, 1937) les qualifiait

réduction bilatéral nous dit, par conséquent, que si un objet x se trouve dans la condition qui est décrite par le prédicat « C » (qu’il s’agisse d’une condition expérimentale ou d’une condition observée), alors il possède la propriété « Q » si et seulement si il subit ou s’il produit l’effet, empiriquement observable ou réalisable, « E »²⁰². Il en découle qu’introduire d’une telle manière, dans le cadre d’un langage formel donné, un prédicat théorique, au sens de prédicat qui n’est pas directement observable ou testable, signifie concevoir ce dernier comme s’il s’agissait d’un type particulier de « terme dispositionnel » (« *disposition-term* »), ou de « concept dispositionnel » (« *disposition-concept* ») (Carnap 1936b, 1937). Un terme, ou prédicat, dispositionnel n’est, en effet, rien d’autre qu’« un prédicat qui désigne non pas une propriété directement observable comme ‘dur’, ‘rouge’, ‘rond’, etc., mais une propriété qui est attribuée à un objet si celui-ci s’avère réagir d’une manière régulière lorsque certaines conditions sont réalisées », et donc qu’un prédicat tel que ceux que l’on peut associer aux termes du langage ordinaire « soluble », « inflammable », « irritable », etc. (Schmitz 2009, p. 385). Mais que gagne-t-on, par conséquent, à envisager l’interprétation empirique des prédicats, et donc des termes, théoriques d’une telle façon ?

Comme l’observait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) lui-même, l’on peut considérer les énoncés de réduction bilatéraux comme étant une alternative aux « définitions (empiriquement) explicites » (« *explicit definitions* ») ou, justement, « opérationnelles » (« *operational* »), c’est-à-dire comme étant une alternative à des énoncés qui remplissent la même fonction que les énoncés de réduction bilatéraux – c’est-à-dire la fonction de mettre des prédicats qui ne sont ni observables, ni réalisables en relation avec de prédicats qui sont, en revanche, observables ou réalisables – mais qui sont de la forme

$$(x) Qx \equiv (Cx \supset Ex)$$

(Hempel 1958 ; 1965, p. 187). Autrement dit, les définitions explicites se distinguent des énoncés de réduction bilatéraux en ceci qu’elles servent, notamment, à fournir une définition définitive et

d’« énoncés de réduction » (« *reduction sentences* ») et appelait, en conséquence, la paire « R_1 », « R_2 » « *paire de réduction pour ‘ Q_3 ’* » (« *reduction pair for ‘ Q_3 ’* ») (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 84).

²⁰² Pour ne donner qu’un exemple, on peut réduire le prédicat (unaire) non directement observable ou réalisable « être fragile » (« *to be fragile* »), « F », aux prédicats (binaires), observables ou réalisables, « être heurté » (« *to be struck* »), « H », et « se casser » (« *to break* »), « C », au moyen de l’énoncé de réduction bilatéral qui affirme ce qui suit : « pour tout objet x et à tout instant t , si cet objet est heurté à cet instant-là, alors on peut dire qu’un tel objet est fragile si et seulement si, toujours à l’instant en question, il se casse ». Il est donc possible de traduire un tel énoncé par la formule « $(x) (t) [H(x, t) \supset (Fx \equiv C(x, t))]$ ». Voir Hempel (1965, p. 109-110) pour plus de précisions à ce sujet.

univoque de la signification d'un certain prédicat « Q » en décrivant des conditions d'application qui sont, à la fois, suffisantes et nécessaires. De ce point de vue-là, la particularité des énoncés de réduction bilatéraux tels que « $(x) Cx \supset (Qx \equiv Ex)$ » consiste, par conséquent, en ceci qu'ils ne nous fournissent qu'une définition conditionnelle du prédicat « Q », c'est-à-dire une définition qui dépend de la condition qu'exprime le prédicat « C ». Il en découle que, en raison même de leur forme logique, les énoncés de réduction bilatéraux ne nous permettent d'identifier que l'une des conditions suffisantes pour l'application du prédicat que l'on est en train de définir, puisqu'ils se limitent à affirmer qu'il suffit que la condition « C » se vérifie pour que tout objet x qui possède la propriété « Q » subisse ou produise l'effet « E », ou bien pour que l'on puisse considérer que tout objet qui subit ou qui produit un tel effet possède la propriété en question. Il s'ensuit que ce que l'on perd à introduire de nouveaux termes théoriques, dans le langage formalisé des sciences, précisément d'une telle manière consiste en ceci que, contrairement aux définitions explicites de nature opérationnelle, les énoncés de réduction bilatéraux ne sont pas en mesure de déterminer une fois pour toutes la signification de tel ou tel « *definiendum* » (c'est-à-dire l'expression qui se trouve, dans les définitions explicites, à la gauche du signe d'équivalence logique) en fonction d'un certain « *definiens* » (c'est-à-dire l'expression qui se trouve, toujours dans les définitions explicites, à la droite de ce même signe), ce qui nous autoriserait à éliminer définitivement le premier du vocabulaire scientifique et à le remplacer par le second²⁰³. Ce que l'on y gagne consiste, en revanche, en ceci que les définitions explicites sont trop rigides pour restituer l'une des caractéristiques fondamentales des concepts et des énoncés de lois les plus généraux que l'on trouve dans le langage des sciences lui-même, c'est-à-dire le fait que, contrairement aux concepts et aux régularités empiriques, ils décrivent des propriétés d'objets qui ne sont pas tout simplement « manifestes » (Jacob 1980a, p. 135), car directement observables, mais potentielles, voire contrefactuelles.

Cela découle du fait que l'on peut supposer que les propriétés contrefactuelles que décrivent les concepts et les énoncés théoriques soient le résultat de processus et d'interactions physiques qui sont

²⁰³ « Ainsi, si nous souhaitons introduire un nouveau terme dans le langage de la science [*'to introduce a new term into the language of science'*], nous devons distinguer deux cas. Si la situation est telle que nous souhaitons fixer la signification du nouveau terme une fois pour toutes [*'we wish to fix the meaning of the new term once for all'*], la forme appropriée [*'the appropriate form'*] est alors la définition [*'definition'*]. En revanche, si nous souhaitons déterminer la signification du terme au moment présent pour certains cas seulement [*'at the present time for some cases only'*], tout en laissant sa détermination ultérieure pour d'autres cas à des décisions que nous entendons prendre pas à pas et sur la base d'une connaissance empirique que nous comptons obtenir dans le futur [*'decisions which we intend to make step by step, on the basis of empirical knowledge which we expect to obtain in the future'*], alors c'est la méthode de la réduction [*'the method of reduction'*], plutôt que celle de la définition, qui est appropriée » (Carnap 1936b, 1937 ; 2015a, p. 91).

plus fondamentaux que ceux que l'on peut considérer comme étant les causes des propriétés manifestes que décrivent les concepts et les énoncés empiriques. Pour s'en apercevoir, il suffit de remarquer que dans le cas d'énoncés tels que « $(x) Qx \equiv (Cx \supset Ex)$ », encore une fois en raison même de leur forme logique, il est nécessaire que le *definiendum*, c'est-à-dire « Qx », soit vrai si et seulement si le *definiens*, c'est-à-dire « $(Cx \supset Ex)$ », l'est également. Néanmoins, ce dernier possède, à son tour, la forme logique d'un énoncé conditionnel, si bien que, d'après la table de vérité qui caractérise ce même connecteur logique dans son interprétation habituelle, nous pouvons en conclure qu'il sera automatiquement vrai chaque fois que l'antécédent « Cx » sera faux (« *ex falso quodlibet* »). Il en découle que l'on sera contraint d'attribuer la propriété que décrit le prédicat « Q » à tous les objets dont on sait qu'ils ne seront jamais soumis, pour telle ou telle raison, à ces mêmes conditions expérimentales dont on suppose qu'elles soient en mesure de trancher la question de savoir si tel ou tel objet possède précisément la propriété en question²⁰⁴. C'est ainsi que, comme le suggérait Carnap (1936b, 1937) lui-même et comme le rappelait également Hempel (1958, 1965), afin d'obtenir une définition du prédicat théorique « Q » qui soit la plus exhaustive possible, sans obfusquer, pour autant, la nature potentielle des propriétés qu'il peut décrire, il est nécessaire de le réduire à une classe de prédicats observables ou réalisables, en construisant, ainsi, de véritables « chaînes (d'énoncés) de réduction » (« *reduction chains* »), telles que la suite d'énoncés

$$(x) C_1x \supset (Qx \equiv E_1x)$$

$$(x) C_2x \supset (Qx \equiv E_2x)$$

$$(x) C_3x \supset (Qx \equiv E_3x)$$

...

$$(x) C_nx \supset (Qx \equiv E_nx)$$

²⁰⁴ « Comme le dira Hempel [(1954)], en résumant l'enterrement de l'opérationnalisme, ce qu'aucune définition opérationnelle ne peut exprimer, c'est le fait que les masses, les températures, les charges et autres propriétés attribuées aux corps physiques subsistent même lorsque ces grandeurs ne sont pas mesurées. Autrement dit, l'exigence de synonymie entre le sens d'un concept physique et un ensemble de manipulations expérimentales est contredite par le fait que les propriétés composant le concept en question ne sont pas simplement 'manifestes', mais 'potentielles. En ce sens, croire à la vérité d'une loi scientifique, c'est croire à la vérité d'un énoncé conditionnel contraire-aux-faits correspondant : croire à la vérité de la gravitation universelle, c'est croire que, si ma machine à écrire n'était pas retenue par une table, elle tomberait par terre. C'est en tout cas un postulat de base de toute la physique, remis en cause par la théorie quantique pour les constituants de l'atome » (Jacob 1980a, p. 135-136).

(Carnap 1936b, 1937 ; Carnap 2015a, p. 91 ; Hempel 1958 ; 1965, p. 207). Les énoncés de réduction bilatéraux dont se compose une telle chaîne nous permettent donc d'élucider diverses facettes de la signification empirique du terme « Q », en identifiant, justement, les différentes manières dont un objet x peut répondre à un certain nombre de conditions observationnelles ou expérimentales, qui représentent autant de conditions suffisantes, mais (du moins individuellement) non nécessaires, pour son application. Il s'ensuit, en outre, que chacun de ces mêmes énoncés de réduction peut être considéré comme étant l'une des conséquences logiques que l'on peut tirer d'une classe d'énoncés qui contient au moins une instance du prédicat « Q » et au moins une instance de chacun des prédicats « E_1 », « E_2 », ..., « E_n », comme, par exemple, la classe $X_Q = \{(x) (C_1x \wedge E_1x), \dots, (x) (C_nx \wedge E_nx), (x) (Qx \wedge E_1x), \dots, (x) (Qx \wedge E_nx)\}$. Cela dit, en quoi les énoncés de réduction bilatéraux, tels que les définissaient Carnap (1936b, 1937) et que les analysait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), seraient-ils liés aux postulats de signification (Carnap 1952) ? Autrement dit, en quoi serait-il possible d'envisager les énoncés de réduction comme étant des postulats de signification, et donc des définitions implicites et analytiques, qui permettraient d'introduire de nouveaux termes théoriques dans un langage formel donné ?

3.1.2 Les énoncés de réduction (bilatéraux) comme postulats de signification ? Carl G. Hempel et le problème de la relativité de la signification empirique des énoncés scientifiques

Afin de répondre à de telles questions, il est utile de partir d'une définition formelle du concept même de définition, telle que celle dont se sert Hempel (1958, 1965), dans son écrit sur la logique de la construction des théories, afin de mener une analyse aussi bien de la forme logique que des conditions de signification empirique des énoncés de réduction tels que les avait formulés Carnap (1936b, 1937) lui-même. Plus précisément, en s'inspirant d'un article d'Alfred Tarski (1935b, 1956) au sujet du problème de « la définissabilité des concepts » (« *die Definierbarkeit der Begriffe* »), Hempel (1958, 1965) y présente la « signification exacte » (« *precise meaning* ») du concept de « définissabilité [du terme] ' v ' au moyen de[s termes] ' v_1 ', ' v_2 ', ..., ' v_n ' » (« *definability of ' v ' by means of ' v_1 ', ' v_2 ', ..., ' v_n '* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 190) de la manière suivante :

' v ' est définissable au moyen du vocabulaire [*definable by means of the vocabulary*] $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ par rapport à un ensemble fini d'énoncés [*a finite set...of statements*] U qui contient, du moins, ' v ' et tous les éléments de V s'il est possible de déduire, à partir de U , au moins un énoncé exprimant une condition nécessaire et suffisante [*at least one sentence stating a necessary and sufficient*

condition'] pour l'application de 'v' qui ne fait référence à aucune autre constante extra-logique que celles qui sont contenues dans V [*no other extralogical constants than the members of V*] (Hempel 1958 ; 1965, p. 190).

Mais en quoi consiste, donc, la caractérisation du concept de « définissabilité » (« *Definierbarkeit* ») que Tarski (1935b, 1956) avait lui-même proposée et en quoi peut-on l'appliquer aux énoncés de réduction, tels que les avait formulés Carnap (1936b, 1937) ? Tarski (1935b, 1956) s'était, en effet, posé la question d'identifier la forme logique que doit posséder tel ou tel énoncé afin que l'on puisse s'en servir pour définir un terme théorique « a », en tant que « constante extra-logique » (« *außerlogische Konstante* ») du langage formel d'une « théorie déductive quelconque » (« *einer beliebigen deduktiven Theorie* »), par rapport à un ensemble B d'autres constantes extra-logiques de ce même langage (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 28). Il était parvenu à la conclusion qu'une telle forme devrait être la suivante :

$$(x) : x = a . \equiv . \Phi(x; b', b'', \dots)$$

où, conformément au formalisme qu'adoptait Tarski (1935b ; 1956), « (x) » signifie « pour tout élément du parcours des valeurs de la variable x », c'est-à-dire pour toute valeur qu'une telle variable peut prendre dans l'univers du langage en question, « = » est le signe d'égalité, « \equiv » est le signe d'équivalence logique, les deux points que l'on voit à la droite et à la gauche du signe d'équivalence tiennent lieu de parenthèses, alors que le signe « $\Phi(x; b', b'', \dots)$ » représente « une fonction propositionnelle [*eine beliebige Satzfunktion*] qui contient x comme seule variable réelle [*die einzige reelle Variable*], et dans laquelle il n'y a pas d'autres constantes extra-logiques [*keine außerlogische Konstante außer den Zeichen*] que b', b'', \dots , qui appartiennent à B [*der Menge B vorkommen*] » (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 28). Il en découle que, d'après Tarski (1935b, 1956), une « définition possible » (« *eventuelle Definition* »), ou tout simplement « une définition du terme ' a ' à l'aide des termes de l'ensemble B » (« *Definition des Zeichens 'a' mit Hilfe der Zeichen der Menge B* ») (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 28), est un énoncé qui décrit, à son tour, la structure logique d'une classe d'énoncés. Mais en quoi consiste, plus précisément, une telle description ? De quelle manière pourrait-elle nous permettre de montrer en quoi il serait possible d'envisager les énoncés de réduction, tels que les définissait Carnap (1936b, 1937), comme étant des définitions analytiques des significations des termes théoriques que l'on peut introduire dans tel ou tel langage formel par leur intermédiaire ?

À partir de ce qu'écrivait Tarski (1935b, 1956) lui-même, nous pouvons en conclure qu'une définition possible du terme « a » par l'intermédiaire des termes de l'ensemble B affirme ce qui suit :

« pour tout élément du parcours des valeurs de la variable x dans l'univers du langage de la théorie en question, la constante extra-logique ' a ' est substituable à un tel élément (si bien qu'on peut l'utiliser pour désigner la totalité de ce même parcours des valeurs) si et seulement si ce dernier appartient à l'ensemble des arguments possibles d'une certaine fonction propositionnelle, ' Φ ', qui ne contient aucune autre constante extra-logique que ' b ', ' b'' ',... », c'est-à-dire « l'on peut utiliser la constante ' a ' pour désigner la totalité du parcours des valeurs de la variable x si et seulement si elle est substituable à n'importe quelle valeur de x dans tous les énoncés dont la forme est décrite par la fonction propositionnelle ' $\Phi(x; b', b'', \dots)$ ' ». En d'autres termes, toujours selon Tarski (1935b, 1956), définir un terme théorique en tant que constante extra-logique d'un certain langage symbolique, par rapport à d'autres constantes extra-logiques de ce même langage, signifie préciser la forme logique que doivent posséder les énoncés dans lesquels peut apparaître la première en faisant explicitement référence aux secondes, et cela non pas à un niveau métalinguistique, mais au sein du langage objet lui-même. Il s'ensuit que, à moins qu'on n'introduise la constante « a » comme terme primitif, il est nécessaire d'en définir la signification de manière récursive, c'est-à-dire par rapport à un ensemble, B , de termes qui sont déjà définis, si bien que toute définition possible du terme « a » doit être considérée comme un énoncé que l'on peut déduire²⁰⁵ d'un autre ensemble d'énoncés, qui sont tenus pour vrais, et qui sont eux-mêmes soit des définitions des termes de l'ensemble B , soit des conséquences logiques de ces mêmes définitions. C'est pourquoi Tarski (1935b, 1956) précisait que la définition d'un terme théorique « a » ne dépend pas uniquement des termes qui sont contenus dans un ensemble de référence, B , mais également des éléments qui constituent un certain ensemble d'énoncés X , dans lesquels apparaissent « ' a ' et tous les termes de B » (« *sowohl 'a' als alle Zeichen von B* »), et dont la clôture déductive contient, justement, « au moins une définition du terme ' a ' à l'aide des termes de B » (« *zumindest eine eventuelle Definition des Zeichens 'a' mit Hilfe der Zeichen von B* ») (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 28). Par conséquent, c'est précisément en cela que consiste la conception formelle de la définissabilité qui sous-tend l'analyse critique du concept même d'énoncé de réduction qu'a menée Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) dans les deux articles auxquels nous nous intéressons ici. Mais où réside, donc, sa pertinence pour une telle analyse ? La

²⁰⁵ Plus précisément, dans ce même article, Tarski (1935b, 1956) définit le concept de « conséquence logique » de la manière suivante : « Soit X un ensemble de propositions [*'eine beliebige Satzmenge'*] et soit y une proposition d'une théorie donnée [*'ein beliebiger Satz der gegebenen Theorie'*]. Nous dirons que y est une conséquence de l'ensemble X [*'eine Folgerung der Satzmenge X'*] ou que y est dérivable de l'ensemble X [*'aus den Sätzen der Menge X ableitbar ist'*], si y est logiquement démontrable [*'logisch beweisbar'*], ou s'il existe une implication logiquement démontrable [*'eine logisch beweisbare Implikation'*] dont le conséquent [*'Nachglied'*] est y et l'antécédent [*'Vorderglied'*] est formé, soit d'une proposition de X , soit d'une conjonction de propositions appartenant à X » (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 27).

thèse que nous défendons ici est que cette caractérisation formelle du concept de définissabilité nous permet de tirer deux conclusions fondamentales au sujet de la forme logique et des conditions de signification empirique des énoncés de réduction tels que les avait définis Carnap (1936b, 1937), qui sont l'une positive et l'autre négative. En quoi consistent, par conséquent, ces deux conclusions ? Et en quoi sont-elles liées aux critiques que Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) a adressées au concept même d'énoncé de réduction ? Quelle est la conception de l'interprétation partielle des termes théoriques que l'on pourrait déduire de ces mêmes critiques ?

En ce qui concerne la conclusion positive que nous pouvons tirer sur la base de la manière dont Tarski (1935b, 1956) a formalisé le concept même de définition et de celle dont Hempel (1958, 1965) a analysé les énoncés de réduction bilatéraux, elle consiste en ceci qu'il est effectivement possible de considérer de tels énoncés comme étant des définitions, quoique partielles – car conditionnelles – qui permettent d'introduire des termes théoriques dans un certain cadre linguistique. En effet, nous pouvons appliquer la formule que Tarski (1935b, 1956) a utilisée pour formaliser le concept de définition d'une constante individuelle, « a », de nature extra-logique, au cas d'une constante de prédicat, « Q », elle aussi de nature extra-logique, en la transformant, tout simplement, en une formule qui relève d'un langage de la logique des prédicats du troisième ordre, en ceci qu'il admet des fonctions propositionnelles qui ont pour arguments des variables ou des constantes qui désignent non pas des individus, mais des relations ou des prédicats (Andrews 2002) :

$$(P) : P = Q. \equiv . \Phi(P; C_1, C_2, \dots, C_n, E_1, E_2, \dots, E_n)$$

où « P » est une variable de prédicat monadique (c'est-à-dire de prédicat à une place) de la logique du premier ordre et « Φ » est une fonction propositionnelle qui contient « P » comme seule variable de prédicat et dans laquelle il n'y a pas d'autres constantes (de prédicats) extra-logiques que celles qui apparaissent dans la chaîne de réduction que l'on peut utiliser pour réduire le prédicat « Q » à une classe de prédicats $B_Q = \{C_1, C_2, \dots, C_n, E_1, E_2, \dots, E_n\}$, dont on suppose qu'ils soient vérifiables ou réalisables. Encore une fois, une telle fonction propositionnelle n'est rien d'autre qu'une description abstraite d'une forme syntaxique particulière, et notamment de celle qui est propre aux énoncés de réduction bilatéraux, c'est-à-dire, comme nous l'avons vu plus haut, aux énoncés de la forme « $(x) C_i x \supset (Qx \equiv E_i x)$ ». Il s'ensuit que, de même que toute définition d'une constante extra-logique « a » au moyen d'un ensemble d'autres constantes extra-logiques, B , est une conséquence logique d'un ensemble, X , d'énoncés qui contiennent aussi bien la première que les secondes, les définitions par réduction à des prédicats observables ou réalisables – du moins telles que nous venons de formaliser sur le modèle de la formule de Tarski (1935b, 1956) – sont dérivables d'ensembles

d'énoncés tels que l'ensemble X_Q que nous avons décrit plus haut²⁰⁶. C'est pourquoi, tout comme Tarski (1935b, 1956) parlait de définition du terme 'a' « à l'aide des termes de l'ensemble B sur la base de l'ensemble de propositions X » (« mit Hilfe der Zeichen der Menge B auf Grund der Satzmenge X ») (Tarski 1935b, 1956 ; 1974, p. 28), nous pouvons parler de « définition du prédicat 'Q' à l'aide des prédicats observables ou réalisables de la classe B_Q sur la base de l'ensemble d'énoncés X_Q ». Nous pouvons donc en conclure que les énoncés de réduction bilatéraux dont parlait Carnap (1936b, 1937) constituent de véritables définitions de termes théoriques. De plus, il s'agit de définitions analytiques, comme le démontre, encore une fois, Carnap (1936b, 1937) lui-même. Considérons, par exemple, une classe d'énoncés de réduction dont on peut se servir pour définir un certain prédicat théorique (c'est-à-dire qui n'est ni observable, ni réalisable au sens de Carnap (1936b, 1937)) « Q_3 » et dont la conjonction est équivalente à un seul et même énoncé de réduction bilatéral,

²⁰⁶ Pour montrer que l'on peut dériver un énoncé de la forme « $C_i a \supset (Qa \equiv E_i a)$ » à partir d'un ensemble d'énoncés comme X_Q , quel que soit a et quel que soit i , il suffit de choisir un certain système de règles d'inférence et de montrer que, dans un tel système, on obtient, justement, « $X_Q \vdash C_i a \supset (Qa \equiv E_i a)$ ». Si nous adoptons, encore une fois, les règles d'inférence du système de la déduction naturelle (Wagner 2014, p. 219-238 ; 259-262), nous pouvons écrire la dérivation suivante. Considérons $\{Qa \wedge E_i a\} \subset X_Q$. Nous pouvons montrer très facilement que, dans un système de déduction naturelle, il est possible de dériver aussi bien « Qa » que « $E_i a$ » à partir du sous-ensemble $\{Qa \wedge E_i a\}$ de X_Q , c'est-à-dire, par la définition même de dérivation, ou déduction (Wagner 2014, p. 236), que $X_Q \vdash_{DN} Qa$ et $X_Q \vdash_{DN} E_i a$. Plus précisément, les règles d'élimination de la conjonction $\wedge E_1$ et $\wedge E_2$ (Wagner 2014, p. 222) nous permettent d'écrire, respectivement, que $\frac{Qa \wedge E_i a}{Qa}$ et $\frac{Qa \wedge E_i a}{E_i a}$. Nous avons donc obtenu une dérivation de « Qa » à partir de X_Q , $\frac{D_1}{Qa}$, et une dérivation de « $E_i a$ » à partir de X_Q , $\frac{D_2}{E_i a}$ (Wagner 2014, p. 259). En utilisant la clause pour l'introduction de l'implication ($\supset I$) dans le cadre d'une dérivation dans un système de déduction naturelle, nous pouvons écrire, par la suite, $\frac{D_1}{E_i a \supset Qa}$ et $\frac{D_2}{Qa \supset E_i a}$, à savoir, respectivement, une dérivation de « $E_i a \supset Qa$ » à partir de X_Q , $\frac{D_3}{E_i a \supset Qa}$, et une dérivation de « $Qa \supset E_i a$ » à partir de X_Q , $\frac{D_4}{Qa \supset E_i a}$ (Wagner 2014, p. 260). Nous appliquons ensuite une autre clause pour l'introduction d'un connecteur logique dans le cadre d'une dérivation dans le système de la déduction naturelle, c'est-à-dire la clause pour l'introduction de la conjonction ($\wedge I$), qui nous permet d'écrire une dérivation de « $((E_i a \supset Qa) \wedge (Qa \supset E_i a))$ » à partir de $X_Q \cup X_Q = X_Q$: $\frac{\frac{D_3}{E_i a \supset Qa} \quad \frac{D_4}{Qa \supset E_i a}}{((E_i a \supset Qa) \wedge (Qa \supset E_i a))}$ (Wagner 2014, p. 260). Nous avons donc obtenu une cinquième dérivation à partir de X_Q , $\frac{D_5}{((E_i a \supset Qa) \wedge (Qa \supset E_i a))}$, à laquelle nous pouvons appliquer, encore une fois, la clause pour l'introduction de l'implication. Ce faisant, nous pouvons écrire que $\frac{D_5}{(C_i a \supset ((E_i a \supset Qa) \wedge (Qa \supset E_i a)))}$, qui n'est rien d'autre qu'une dérivation de « $C_i a \supset ((E_i a \supset Qa) \wedge (Qa \supset E_i a))$ » à partir de X_Q , c'est-à-dire $X_Q \vdash_{DN} C_i a \supset (Qa \equiv E_i a)$, ce qu'il fallait démontrer.

tel que « $(x) Q_1x \supset (Q_2x \equiv Q_3x)$ », où « Q_1 » et « Q_2 » sont, encore une fois, deux prédicats observables ou réalisables. En quoi consiste donc l'information factuelle que nous fournit un tel énoncé, c'est-à-dire sa signification empirique, d'après une conception vérificationniste de cette dernière ? Comme l'observe, encore une fois, Carnap (1936b, 1937), un énoncé de cette forme se limite à affirmer que le prédicat « Q_3 » s'applique à une certaine classe d'individus de l'univers du discours du langage en question (comme, par exemple, une certaine classe de points du *continuum* spatio-temporel). Plus précisément, il affirme que le prédicat « Q_3 » s'applique à tous les individus de ce même univers du discours qui partagent la propriété correspondant à un autre énoncé, « $(x) \sim [(Q_1x \wedge Q_2x) \wedge (Q_1x \wedge \sim Q_2x)]$ », que l'on peut considérer, en conséquence, comme étant son « énoncé représentatif » (« *representative statement* ») (Carnap 1936b, 1937 ; Carnap 2015a, p. 92). Ce dernier n'est, en effet, rien d'autre que la négation de « $(\exists x)[(Q_1x \wedge Q_2x) \wedge (Q_1x \wedge \sim Q_2x)]$ », c'est-à-dire la négation de la possibilité qu'il existe au moins un individu de l'univers du discours en question qui puisse satisfaire à la fois les conditions de vérité de l'énoncé « $(x) Q_1x \supset (Q_2x \equiv Q_3x)$ » (c'est-à-dire « $(Q_1x \wedge Q_2x)$ ») et les conditions qui le rendent faux (c'est-à-dire « $(Q_1x \wedge \sim Q_2x)$ »). Il se trouve, néanmoins, qu'un énoncé représentatif de la forme « $(x) \sim [(Q_1x \wedge Q_2x) \wedge (Q_1x \wedge \sim Q_2x)]$ » est logiquement équivalent à « $(x)[\sim(Q_1x \wedge Q_2x) \vee \sim(Q_1x \wedge \sim Q_2x)]$ », et donc équivalent à « $(x)[\sim Q_1x \vee \sim Q_2x \vee \sim Q_1x \vee Q_2x]$ » aussi, qui est à son tour équivalent à l'énoncé « $(x)[\sim Q_1x \vee \sim Q_2x \vee Q_2x]$ », c'est-à-dire à un énoncé qui est analytique (Carnap 1936b, 1937 ; Carnap 2015a, p. 92), au sens de « L-vrai »²⁰⁷. Il en découle qu'il est toujours possible d'exprimer le

²⁰⁷ Il faut, cependant, remarquer que cet argument ne peut servir qu'à démontrer l'analyticité des énoncés de réduction bilatéraux pris singulièrement, et non pas l'analyticité de la conjonction de deux ou de plusieurs énoncés de réduction bilatéraux, comme l'a montré, à plusieurs reprises, Hempel (1950b, 1951, 1963, 1965) lui-même. Considérons, par exemple, une classe d'énoncés de réduction, R , qui peut servir de définition pour le prédicat théorique « Q », dans le contexte d'un certain langage L , et qui est équivalente à la conjonction de deux énoncés de réduction bilatéraux, à savoir « $(x) P_1 \supset (Qx \equiv P_2x)$ » et « $(x) P_3 \supset (Qx \equiv P_4x)$ ». Il en découle que l'ensemble des individus de l'univers du discours de L qui satisfont les énoncés de R n'est rien d'autre que l'ensemble des individus qui ne satisfont ni l'énoncé « $P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge \sim P_4$ » (c'est-à-dire l'énoncé qui exprime la conjonction des conditions qui rendent vrai le premier énoncé de réduction bilatéral et de celles qui rendent faux le second), ni l'énoncé « $P_1 \wedge \sim P_2 \wedge P_3 \wedge P_4$ » (c'est-à-dire l'énoncé qui exprime la conjonction des conditions qui rendent vrai le second énoncé de réduction bilatéral et de celles qui rendent faux le premier), si bien que l'énoncé représentatif, au sens de Carnap (1936b, 1937), d'une telle classe est de la forme « $(x) [\sim (P_1 \wedge P_2 \wedge P_3 \wedge \sim P_4) \wedge \sim (P_1 \wedge \sim P_2 \wedge P_3 \wedge P_4)]$ ». Comme l'explique, justement, Hempel (1950b, 1951, 1963, 1965), un tel énoncé est un énoncé qui n'est ni L-vrai, ni L-faux, c'est-à-dire un énoncé synthétique. C'est précisément pour une telle raison que Carnap (1963) a été amené à préciser, par la suite, que la propriété d'analyticité ne s'applique pas à toutes les classes d'énoncés de réduction, mais seulement à celles dont la conjonction, C , n'est constituée que d'un seul et unique énoncé de réduction bilatéral.

contenu factuel que fournit un énoncé de réduction bilatéral, et donc sa signification empirique, par l'intermédiaire d'un énoncé analytique, si bien que nous pouvons considérer les énoncés d'une telle forme comme étant non seulement de possibles définitions des termes théoriques qu'ils permettent d'introduire dans tel ou tel langage formalisé, mais également comme étant des énoncés qui sont analytiques non pas en raison de leur forme logique, mais en raison des significations des termes descriptifs qu'ils contiennent, c'est-à-dire comme étant des énoncés analytiques au sens d'« A-vrais ». C'est en cela que consiste, par conséquent, la conclusion positive au sujet des énoncés de réduction bilatéraux tels que les définissait Carnap (1936b, 1937) que nous pouvons déduire des objections de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), c'est-à-dire en ceci que nous pouvons interpréter de tels énoncés comme étant des postulats de signification qui s'appliquent également aux termes théoriques et non seulement aux termes de tel ou tel langage d'observation.

Quant à la conclusion négative que nous pouvons tirer au sujet des énoncés de réduction bilatéraux sur la base de ces mêmes critiques, elle découle du fait que, tout comme la définition du terme « a » dont il est question dans l'article de Tarski (1935b, 1956) ne dépend pas uniquement des termes qui constituent les éléments de l'ensemble B , mais également des énoncés dont se compose l'ensemble X , la définition par réduction (bilatérale) du prédicat « Q », telle que nous venons de la formaliser, dépend non seulement des prédicats de la classe B_Q , mais également des énoncés de l'ensemble X_Q , dont elle est une conséquence logique. De tels énoncés ne sont, cependant, rien d'autre que l'expression de deux types d'informations : d'une part, ils sont l'expression d'informations qui concernent la coprésence de deux qualités observables, ou réalisables, dans la même situation empirique, c'est-à-dire d'informations que l'on peut exprimer au moyen d'énoncés qui sont de nature synthétique (car ils ne sont ni L-vrai, ni L-faux, en ceci que leur valeur de vérité ne dépend pas uniquement de leur forme logique) et de la forme « $(x) (C_i x \wedge E_i x)$ » ; d'autre part, ils sont l'expression d'informations qui concernent les relations que l'on peut établir entre la qualité non observable (ou du moins non directement observable) que dénote le prédicat théorique « Q » et les différents effets empiriques que dénotent les prédicats « E_1 », ..., « E_n », c'est-à-dire d'informations que l'on peut exprimer au moyen d'énoncés, eux aussi de nature synthétique, qui sont de la forme « $(x) (Qx \wedge E_i x)$ ». Dans les deux cas, il s'agit, en conséquence, d'énoncés synthétiques que l'on a établis soit sur la base d'autres observations ou d'autres expériences que celles dont il est question dans la réduction du prédicat théorique « Q » aux classes de prédicats observables ou réalisables (C_i) et (E_i), soit en les déduisant d'énoncés où apparaissent d'autres prédicats théoriques que « Q » lui-

même²⁰⁸. Il en découle qu'aucune chaîne de réduction ne saurait déterminer à elle seule, ne serait-ce que de manière partielle, la signification empirique de prédicats théoriques tels que le prédicat « Q ». Comme l'observait Hempel (1950b, 1951, 1965) lui-même, « il n'est pas correct de parler, comme on le fait souvent, de la 'signification expérimentale' d'un terme ou d'un énoncé isolés » (« *it is not correct to speak, as is often done, of 'the experiential meaning' of a term or a sentence in isolation* ») (Hempel 1950b, 1951, 1965 ; Jacob 1980b, p. 78). La signification expérimentale d'une expression donnée, « E », poursuivait-il, « compte tenu de données empiriques potentielles » (« *potential empirical data* ») dépend de deux facteurs :

- I. *Le cadre linguistique* [*'linguistic framework'*] L auquel l'expression appartient. Ses règles [*'rules'*] déterminent en particulier les énoncés (observationnels ou non) qu'on peut inférer d'un certain énoncé ou d'une certaine classe d'énoncés [*'inferred from a given statement or class of statements'*] ;
- II. Le contexte théorique [*'theoretical context'*] dans lequel l'expression apparaît, autrement dit la classe des énoncés de L utilisables comme hypothèses subsidiaires [*'subsidiary hypotheses'*]

(Hempel 1950b, 1951, 1965 ; Jacob 1980b, p. 79). Pour ne donner qu'un exemple, qui est évoqué par Hempel (1950b, 1951, 1965 ; Jacob 1980b, p. 79) lui-même, il est possible de formuler l'énoncé de la « loi newtonienne de la gravitation » (« *Newton's law of gravitation* »), $F = G \frac{mm'}{r^2}$ (Feynman, Leighton & Sands 1964, p. 7-9) comme s'il s'agissait d'une définition explicite du concept de « force gravitationnelle » :

$$(x) (y) F(x, y) \equiv [(m(x) \wedge m'(y) \wedge r(x, y)) \supset G(x, y)]$$

où « $F(x, y)$ » signifie « il existe une force d'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre les corps x et y », « $m(x)$ » signifie « le corps x possède une masse, mesurable, de m_1 Kg », « $m'(y)$ » signifie « le corps y possède une masse, mesurable, de m_2 kilogrammes », « $r(x, y)$ » signifie « les corps x et

²⁰⁸ Considérons, par exemple, un prédicat non observable « O » ayant la même extension que « Q », et donc s'appliquant aux mêmes objets. Nous pouvons écrire, par conséquent, que « $(x) Qx \equiv Ox$ ». Faisons, ensuite, l'hypothèse que l'on ait réussi à réduire ce même prédicat au couple « condition-effet » que constituent les prédicats observables ou réalisables « D » et « E », où « D » ≠ « C », si bien que nous pouvons en conclure que « $(x) Dx \supset (Ox \equiv Ex)$ ». À partir de cet autre énoncé, nous pouvons donc en déduire l'énoncé « $(x) (Ox \wedge Ex)$ », qui est logiquement équivalent à l'énoncé « $(x) (Qx \wedge Ex)$ ».

y se trouvent à une distance linéaire de r mètres l'un de l'autre » et « $G(x, y)$ » signifie « les états de mouvement (ou de repos) des corps x et y subissent une modification, mesurable, dont l'intensité est égale à ' $G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, newton, où ' G ' n'est rien d'autre que la constante de gravitation universelle ». Cela dit, en quoi pourrait-on déterminer la signification empirique des prédicats « $m(x)$ », « $m'(y)$ », « $r(x, y)$ » et « $G(x, y)$ » de telle sorte qu'on puisse les considérer comme étant des prédicats réalisables, si bien que la définition explicite du prédicat « $F(x, y)$ » que nous venons de donner en deviendrait, par conséquent, une définition opérationnelle ?

Comme le remarquait, encore une fois, Hempel (1950b, 1951, 1965), pour ce faire, il est nécessaire d'avoir à disposition au moins deux éléments. D'une part, il est nécessaire de disposer d'un appareil mathématique suffisamment puissant pour qu'on puisse développer les conséquences mathématiques que l'on peut tirer de la formule qui est associée à l'énoncé qui constitue la loi de la gravitation universelle. Il est nécessaire, par exemple, de disposer des concepts et des théorèmes du calcul différentiel qui permettent de concevoir toute force physique, en tant que modèle mathématique d'un processus physique, comme consistant dans la modification de l'état de mouvement (ou de repos) du corps sur lequel elle agit, et plus précisément comme étant une variation du degré de variation de ce

même état, c'est-à-dire comme consistant dans une forme d'accélération, conformément à la « seconde loi [de la dynamique] de Newton » (« *Newton's Second Law* ») (Feynman, Leighton & Sands 1964, p. 9-2), $F = ma = m \frac{dv(t)}{dt} = m \frac{d^2l(t)}{dt^2}$, où « $v(t)$ » représente la vitesse du corps en question, en fonction du temps, et « $l(t)$ » est la distance que parcourt ce dernier, toujours en fonction du temps. D'autre part, il est également nécessaire d'avoir à disposition des procédures et des dispositifs expérimentaux permettant de mesurer les masses respectives de deux corps x et y , leur distance et, surtout, la valeur de la constante « G », comme, par exemple, la « balance de Cavendish », dont on peut voir une version simplifiée dans le



Figure 3 : Diagramme qui représente, de manière simplifiée, la balance de Cavendish en tant que dispositif expérimental (Feynman, Leighton & Sands 1964, p. 7-9)

diagramme à la figure (3), issue de Feynman, Leighton & Sands (1964). Dans cette version simplifiée, la balance de Cavendish consiste en un bras en bois aux extrémités duquel sont fixées deux boules de

cuivre, de la même masse, et qui est suspendu à un fil, appelé « fil de torsion » (« *torsion fiber* »). Lorsque deux boules de cuivre supplémentaires, de taille plus grande que les premières mais toujours de masses égales entre elles, sont positionnées d'un côté et de l'autre de la balance, une force d'attraction gravitationnelle s'engendre entre ces dernières et les deux boules, plus petites, qui se trouvent aux extrémités du bras. Une telle force fait tourner le bras de la balance dans le plan perpendiculaire au fil, jusqu'à ce qu'elle ne soit contrecarrée par la réponse élastique, de sens inverse, que ce dernier oppose à un tel mouvement de torsion. Conformément à la loi de Hooke, cette réponse est « proportionnelle à la torsion » (« *proportional to the distortion* ») (Feynman, Leighton & Sands 1964, p. 7-9) que subit le fil lui-même, selon une constante de proportionnalité, « k », qui dépend du matériau dont est fait ce dernier. C'est ainsi que, lorsque la balance s'arrête, ayant atteint un point d'équilibre où la force d'attraction gravitationnelle et la force de rappel élastique sont équivalentes, il est possible d'estimer la valeur de la constante « G » de la manière suivante :

$$\theta k = G \frac{Mm}{r^2} \rightarrow G = \frac{\theta k r^2}{Mm}$$

où « θ » est l'angle qui sépare la position de départ du bras de la balance de sa position d'équilibre (et qui mesure ainsi le niveau de torsion du fil), « k » est la constante de rappel élastique associée au matériau dont est fait le fil, « M » est la masse de chacune des boules de grande taille, « m » est la masse des boules de petite taille et « r^2 » est le carré de l'intensité du vecteur distance qui relie le centre de masse de la sphère de petite taille à celui de la sphère de grande taille, des deux côtés de la balance, lorsque cette dernière a atteint sa position d'équilibre.

L'exemple de la balance de Cavendish nous montre, par conséquent, que les procédures et les dispositifs qui sont nécessaires pour préciser la signification empirique des termes qui apparaissent dans des énoncés de lois tels que celui de la loi de la gravitation universelle nécessitent le recours à des hypothèses subsidiaires, qui consistent soit en d'autres lois que celle dont on est en train d'interpréter l'énoncé²⁰⁹ – comme, dans le cas de la balance de Cavendish, la loi de Hooke – soit en des énoncés dont la fonction revient, précisément, à donner une interprétation empirique à des

²⁰⁹ Hempel (1963) a lui-même soulevé un problème analogue lorsqu'il a observé que l'efficacité des énoncés de réduction bilatéraux, ainsi que celle des paires de réduction, dont parlait Carnap (1936b, 1937), en tant que définitions partielles et conditionnelles de termes théoriques en fonction de termes observationnels, dépend du fait que leurs énoncés représentatifs possèdent « le caractère d'un énoncé qui est vrai en vertu de lois générales » (« *the character of a statement that holds by virtue of general laws* »), c'est-à-dire du fait que leur « contenu factuel » (« *factual content* ») soit lui-même de « caractère nomologique » (« *law-like character* ») (Hempel 1963, p. 689).

prédicats dont on peut se servir pour interpréter, à leur tour, ceux qui apparaissent dans l'énoncé de loi en question – tels que, pour se limiter toujours au cas de la balance de Cavendish, les prédicats « être de masse ' M ' », « se trouver à une distance ' r ' du corps de masse ' M ' », « être tordu à un angle de ' θ ' degrés », etc. Une telle interprétation empirique ne peut, néanmoins, qu'être partielle, en ceci qu'elle ne s'applique qu'aux conditions particulières dans lesquelles s'effectuent les différentes mesures. Autrement dit, afin d'attribuer une signification empirique aux prédicats que l'on peut utiliser pour définir le concept théorique de force d'attraction gravitationnelle, il est nécessaire de définir, au préalable, non seulement un cadre linguistique mathématique, comportant des règles de déduction de formules mathématiques à partir d'autres formules, mais également un contexte théorique, comportant des règles d'interprétation, toujours partielle, de ces mêmes prédicats. La conclusion négative au sujet du concept même d'énoncé de réduction bilatéral que nous pouvons tirer des critiques que Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) a soulevées contre ce dernier consiste, par conséquent, en ceci que l'interprétation partielle des termes théoriques que l'on souhaite introduire dans tel ou tel cadre linguistique nécessite la préexistence d'un contexte théorique et empirique, si bien qu'elle ne saurait se réduire, tout simplement, à des classe d'énoncés de réduction, aussi vastes soient-elles. Il en découle que cette autre conclusion négative nous suggère, également, une certaine conception de l'interprétation partielle du langage théorique dont on peut se servir pour formuler les lois qui constituent le corps conceptuel de tel ou tel théorie, et que l'on pourrait qualifier de conception « holiste ». Mais en quoi consiste, plus précisément, cette conception holiste ? En d'autres termes, l'analyse critique du concept d'énoncé de réduction que nous venons de mener, sur la base des réflexions de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), nous a permis, par conséquent, de mettre en avant les limites de la manière dont Carnap (1936b, 1937, 1945a) a affronté la question de la signification empirique des énoncés scientifiques comme éléments d'un langage-système. Mais est-ce qu'une telle analyse pourrait également nous permettre d'en tirer une certaine conception de la reconstruction formelle des théories scientifiques en tant que construction de cadres linguistiques ?

Afin de répondre à une telle question, il est utile de prendre en considération l'approche de la reconstruction formelle des théories scientifiques que présente Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), dans les mêmes articles que nous avons analysés plus haut, et que l'on peut considérer comme étant une anticipation de la conception classique telle qu'elle a été développée par Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966, Psillos & Carnap 2000) lui-même entre 1956 et 1966. Il s'agit, en effet, d'une conception de la reconstruction formelle des théories scientifiques comme construction de systèmes axiomatiques d'énoncés théoriques qui sont interprétés, quoique toujours de manière

partielle, par le biais d'autres systèmes d'énoncés, appelés, justement, « systèmes interprétatifs »²¹⁰. Plus précisément, tel que le définit Hempel (1958, 1965), un système interprétatif consiste en ce qui suit :

Soit T une théorie caractérisée par un ensemble de postulats [*characterized by a set of postulates*] qui sont formulés dans un *vocabulaire théorique* fini [*a finite theoretical vocabulary*] V_T , et soit V_B un autre ensemble de termes extra-logiques [*a second set of extra-logical terms*], que nous appellerons *vocabulaire de base* [*basic vocabulary*], qui ne contient aucun terme de V_T . Par *système interprétatif* pour T ayant pour base V_B [*an interpretative system for T with the basis V_B*], nous entendons donc un ensemble J d'énoncés (i) qui est fini [*finite*], (ii) qui est logiquement compatible [*logically compatible*] avec T , (iii) qui ne contient aucun terme extra-logique qui ne soit pas contenu dans V_T ou dans V_B , (iv) qui contient tous les éléments des ensembles V_T et V_B de manière essentielle [*essentially*], c'est-à-dire, qui n'est pas logiquement équivalent [*logically equivalent*] à un quelconque ensemble d'énoncés où quelques-uns parmi les termes de V_T ou de V_B n'apparaissent jamais (Hempel 1958 ; 1965, p. 208).

Il en découle que la conception de la reconstruction logique et formelle des théories scientifiques que prônait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) retient l'un des aspects fondamentaux de la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle de la science en tant que corps de connaissances, dont nous avons parlé dans les chapitres précédents, tout en le modifiant. Il s'agit, plus précisément, de l'idée que le cadre linguistique au moyen duquel on peut reconstruire la structure et le contenu de tel ou tel langage-système scientifique devrait s'articuler sur deux niveaux de constitution : d'une part, il devrait consister en une base empirique, dont le choix constituerait, cependant, une opération qui serait de nature purement pragmatique et qui ne dépendrait, par conséquent, pas d'une relation privilégiée qu'une certaine classe d'énoncés entretiendrait avec

²¹⁰ Bien que le concept de système interprétatif que nous analysons ici ait été développé par Hempel (1958, 1965) entre 1958 et 1965, il était déjà présent, en germe, dans ses articles sur les critères de signification empirique qui datent de 1950 et de 1951 : « Si l'on peut par conséquent attribuer une signification cognitive à quoi que ce soit, ce sera aux systèmes théoriques entiers formulés dans un langage doté d'une structure bien déterminée [*only to entire theoretical systems formulated in a language with a well-determined structure*]. Un système de ce genre semble posséder une signification cognitive lorsqu'il est interprétable en termes d'observables [*an interpretation for it in terms of observables*] » (Hempel 1950b, 1951, 1965 ; 1980b, p. 80).

quelques faits ultimes de l'expérience²¹¹ ; d'autre part, il devrait également consister en un corps conceptuel qu'il faudrait constituer en introduisant des termes théoriques dans le cadre linguistique en question, par l'intermédiaire d'énoncés de réduction, ou, dans une version plus tardive de la conception carnapienne de la reconstruction formelle des théories scientifiques (Carnap 1956a), au moyen de règles de correspondance. En conséquence, de même que celle que défendait Carnap (1934, 1936b, 1937, 1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), la conception de la reconstruction des théories scientifiques qu'esquisse ici Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) préconise de concevoir ces dernières comme consistant en des systèmes d'énoncés scientifiques qui s'étagent sur deux niveaux, à savoir un niveau supérieur, qui constitue la théorie proprement dite et qui consiste dans un ensemble de postulats formulés dans un vocabulaire théorique V_T , et un niveau inférieur, qui se constitue d'un second système d'énoncés, J , formulés dans un autre vocabulaire que le vocabulaire théorique, que Hempel (1958, 1965) appelait justement le « vocabulaire de base » (« *basic vocabulary* »), V_B , et dont la fonction consiste précisément à fournir une interprétation empirique aux postulats de T (qui repose, par conséquent, sur ce même vocabulaire de base).

Il en découle que les systèmes interprétatifs, J , dont parlait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) peuvent être considérés comme étant une généralisation des concepts de classe d'énoncés de réduction bilatéraux et de chaîne de réduction que Carnap (1936b, 1937) avait introduits dans *Testabilité et signification*. Hempel (1954) précisait, en effet, qu'il faudrait considérer comme étant un « énoncé représentatif » (« *representative sentence* »), c'est-à-dire comme étant un élément qui appartient au système interprétatif d'une théorie donnée, tout énoncé, quel qu'en soit le caractère logique, qui permette de déterminer, quoique de manière partielle et indirecte, la signification de tel ou tel terme théorique en posant des contraintes aux conditions de vérité des énoncés dans lesquels apparaît ce dernier, et notamment aux conditions de vérité des axiomes dans lesquels il apparaît en

²¹¹ Comme l'écrivait Hempel (1963) lui-même, « en épousant quelques-unes des idées qu'avait avancées Popper, Carnap a vite rejeté l'idée qu'il existerait une classe privilégiée d'énoncés protocolaires' [*a privileged class of 'protocol sentences'*] que l'on pourrait concevoir comme étant des énoncés ultimes dans le processus de vérification empirique, comme étant des arbitres finaux dans la mise à l'épreuve de toutes les théories scientifiques [*conceived as terminal statements in the process of empirical verification, as final arbiters in the test of all scientific theories*]. Tout énoncé qui exprime des preuves empiriques est susceptible d'être mis ultérieurement à l'épreuve [*capable of further test*], et les énoncés qui servent de preuves empiriques, tout comme les autres énoncés scientifiques, sont établis [*established*], c'est-à-dire intégrés dans le système de tous les énoncés que l'on considère comme acceptés [*incorporated into the total system of accepted statements*], seulement 'jusqu'à nouvel ordre' [*'until further notice'*], étant entendu que l'on pourrait toujours les réévaluer, et notamment les rejeter, à la lumière de preuves supplémentaires » (Hempel 1963, p. 702).

tant que terme primitif²¹². C'est pourquoi Hempel (1954, 1958, 1965) énumérait, parmi les différents cas particuliers d'énoncés représentatifs, les types d'énoncés suivants : premièrement, les définitions explicites, de nature opérationnelle, dont nous avons parlé plus haut ; deuxièmement, les chaînes d'énoncés de réduction dont parlait Carnap (1936b, 1937) ; troisièmement, les « énoncés de traduction » (« *translation sentences* ») de propositions formulées dans les termes d'un vocabulaire théorique donné en propositions formulées dans les termes d'un certain vocabulaire observationnel qu'avait décrits Norman R. Campbell (1920), et que l'on peut formaliser comme s'il s'agissait d'« énoncés biconditionnels » (« *biconditionals* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 208), c'est-à-dire d'énoncés de la forme « *t* si et seulement si *o* », ou « $t \equiv o$ », où « *t* » représente, précisément, une proposition théorique et « *o* » une proposition observationnelle ; quatrièmement, des énoncés qui ne contiennent que des termes théoriques non observationnels, mais qui contribuent, justement, à définir les conditions de vérité des énoncés dans lesquels peuvent figurer ces derniers – et qui se prêtent, tout de même, à d'éventuelles vérifications empiriques par le biais des conséquences qu'il est possible d'en tirer dans le cadre de tel ou tel langage observationnel –, tels que, par exemple, « les postulats de signification qu'ont récemment suggérés [John G.] Kemeny [(1952)] et Carnap [(1952)] » (« *the meaning postulates recently suggested by Kemeny and Carnap* ») (Hempel 1954 ; 1965, p. 130)²¹³. Une telle conception de la reconstruction formelle des théories scientifiques nous fournit, par conséquent, deux réponses complémentaires à la question de savoir pourquoi il faudrait considérer le langage formel dont on peut se servir, justement, pour effectuer une telle reconstruction comme étant un langage qui ne serait que partiellement interprété. D'une part, le caractère partiel de l'interprétation empirique d'un tel langage n'est rien d'autre qu'une conséquence directe de la distinction nette

²¹² « Une fois que l'idée de spécification partielle de la signification [d'énoncés qui contiennent des termes théoriques non observationnels] a été acceptée, il ne semble, cependant, pas nécessaire de restreindre le domaine des énoncés qui effectuent cette interprétation partielle aux énoncés de réduction au sens de Carnap [(1936b, 1937)] [*it appears unnecessarily restrictive, however, to limit the sentences effecting such partial interpretation to reduction sentences in Carnap's sense*']. Il est possible d'exprimer une spécification partielle des significations d'un ensemble de termes non observationnels, de manière plus générale, par le biais d'un ou de plusieurs énoncés qui mettent en relation ces mêmes termes et ceux du vocabulaire observationnel, mais qui ne possèdent pas la forme d'énoncés de réduction [*by one or more sentences that connect those terms with the observational vocabulary but do not have the form of reduction sentences*'] » (Hempel 1954, p. 130).

²¹³ Comme l'observait Hempel (1954) lui-même, en effet, « l'on peut considérer la condition que deux termes théoriques doivent être mutuellement exclusifs [que l'on peut exprimer au moyen d'un postulat de nature purement théorique] comme étant une limitation et donc, en ce sens, une spécification partielle de leurs significations » (« *the stipulation that two theoretical terms are to be mutually exclusive may be regarded as a limitation and, in this sense, a partial specification of their meanings* ») (Hempel 1954, p. 130).

qu'établissait Hempel (1958, 1965) lui-même entre le vocabulaire théorique et le vocabulaire de base. En faisant une telle distinction, Hempel (1958, 1965) visait, en effet, à formaliser la différence qui existe entre le vocabulaire qu'il faut construire, pour ainsi dire, « de toute pièce » pour formuler une nouvelle théorie (et qui correspondrait donc au vocabulaire V_T) et le vocabulaire qui est déjà utilisé pour décrire les phénomènes, ainsi que les généralisations nomologiques préexistantes, que la théorie en question vise à systématiser (et qui correspondrait, par conséquent, au vocabulaire V_B), et que l'on peut considérer, en conséquence, comme étant déjà « compris » (« *understood* ») indépendamment de cette dernière (Hempel 1970, p. 143). C'est pourquoi, dans des écrits postérieurs tels que l'article sur la « conception standard » (« *standard conception* ») des théories scientifiques que nous avons cité dans les chapitres précédents, Hempel (1970) parle plutôt d'une distinction entre le vocabulaire d'une théorie donnée, V_T , et le « vocabulaire préthéorique ou antécédent » (« *the pre-theoretical, or antecedent, vocabulary* »), V_A , « relatif à la théorie en question » (« *relative to the theory in question* ») (Hempel 1970, p. 143)²¹⁴. D'autre part, l'interprétation partielle d'un tel langage formel sert également à restituer, d'une manière qui soit la plus générale possible, les multiples façons dont on peut attribuer une signification empirique aux énoncés dont se compose une théorie donnée, et qui se reflètent aussi dans la pluralité des formes logiques que possèdent les énoncés que Hempel (1954, 1958, 1965) considérait comme étant de possibles énoncés interprétatifs. La multiplicité des manières dont on peut s'effectuer l'interprétation d'un langage théorique donné est, en outre, la conséquence directe de la relativité de la signification de tout énoncé scientifique par rapport à un certain contexte théorique, qui comporte, comme nous l'avons vu plus haut, aussi bien des énoncés proprement théoriques que des énoncés ayant une portée empirique, et que l'on peut formaliser, précisément, au moyen d'un système interprétatif donné. Nous pouvons donc en conclure que la conception de l'interprétation partielle d'énoncés théoriques en fonction d'énoncés observationnels que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) reposait moins sur des considérations de nature logique que sur des considérations de nature méthodologique, ou épistémologique.

Néanmoins, comme nous l'avons anticipé plus haut, une telle conception de l'interprétation, comme interprétation partielle, du langage formel, en tant qu'ensemble de termes observationnels et de termes théoriques, dans lequel on peut reconstruire les théories scientifiques était également

²¹⁴ Comme le remarque Jacques Bouveresse (2012), le vocabulaire préthéorique ou antécédent dont parlait Hempel (1970) est, essentiellement, « un vocabulaire qui puisse être compris antérieurement à l'introduction de la théorie, et dont l'usage soit gouverné par des principes qui, au moins au départ, sont indépendants de la théorie. Mais ce vocabulaire préalable n'a nul besoin d'être, et n'est généralement pas, un vocabulaire observationnel au sens étroit : il contiendra au contraire le plus souvent des termes qui ont été introduits primitivement dans le contexte d'une théorie déjà disponible » (Bouveresse 2012, p. 169).

associée à une conception de l'interprétation de ces mêmes théories, en tant que systèmes d'énoncés, que l'on pourrait qualifier de « holiste ». Plus précisément, cette autre conception de l'interprétation empirique se résume à l'idée qu'il serait nécessaire, comme l'écrivait Hempel (1954) lui-même, de « faire l'économie de la distinction, que nous avons jusqu'ici maintenue à des fins d'exposition [*for expository purposes*'], entre les énoncés interprétatifs... et le reste des énoncés dont se constitue une théorie scientifique donnée [*and the balance of the sentences constituting a scientific theory*'] », si bien que « nous pourrions tout simplement concevoir ces deux ensembles d'énoncés comme constituant une seule et même 'théorie interprétée' [*as constituting one 'interpreted theory*'] » (Hempel 1954 ; 1965, p. 133). Mais en quoi ce présupposé serait-il justifié ? Afin de répondre à cette question, l'on peut remarquer que, pour sa part, Hempel (1963) faisait remonter une telle idée à la conception de la vérification empirique des théories scientifiques que l'on peut retrouver dans l'un des premiers écrits de Carnap (1934), c'est-à-dire dans *Die logische Syntax der Sprache*. En effet, dans le paragraphe de ce même ouvrage qu'il consacre aux problèmes liés à « la logique du langage de la physique » (« *die Logik der physikalische Sprache* »), et notamment à la question de la testabilité des hypothèses physiques par l'intermédiaire des énoncés protocolaires qui en constituent de possibles conséquences logiques, Carnap (1934) écrit qu'il est généralement impossible de déduire des « L-conséquences, ayant la forme d'énoncés protocolaires, qui se prêtent à la vérification empirique » (« *geeignete L-Folgen von Protokollsatzform* ») à partir d'une seule hypothèse isolée, ne serait-ce que parce que, afin d'effectuer une telle déduction, il est nécessaire que « l'on se serve également des hypothèses restantes » (« *die übrigen Hypothesen mitverwendet werden* ») (Carnap 1934, p. 246). Il en concluait, par conséquent, que, comme l'avaient déjà suggéré Duhem et Poincaré, « la mise à l'épreuve [empirique] ne concerne pas, au fond, une seule et unique hypothèse, mais le système entier de la physique en tant que système d'hypothèses » (« *Daher betrifft die Nachprüfung im Grund nicht eine einzelne Hypothese, sondern das ganze System der Physik als ein Hypothesensystem* ») (Carnap 1934, p. 246)²¹⁵. C'est ainsi que Hempel (1963) pouvait inscrire sa propre conception holiste de l'interprétation des théories scientifiques dans la droite ligne d'une telle théorie de la vérification (et, plus tardivement, de la confirmation) empirique, en affirmant qu'il serait possible d'inférer la première à partir de la seconde, moyennant trois remarques supplémentaires : premièrement, l'on peut remarquer que c'est seulement à partir de la conjonction de **T** et de **J**, et non pas du seul système de postulats théoriques **T**, qu'il est possible de tirer des conclusions que l'on peut exprimer dans les termes du vocabulaire de base **V_B** ; deuxièmement, il n'est pas nécessaire que le

²¹⁵ Il s'agit, comme nous l'avons remarqué plus haut, de ce qu'on appelle communément « la thèse de Duhem-Quine » (« *the Duhem-Quine thesis* ») (Harding 1976), et que Quine (1951, 1953) lui-même faisait également remonter aux premiers écrits de Carnap (1928), notamment à *La Construction logique du monde*.

système interprétatif *J* contienne uniquement des énoncés qui se composent, totalement ou en partie, de termes observationnels, comme en témoigne, précisément, le fait qu'il soit possible de considérer les postulats de signification de Carnap (1952, 1966) comme étant des énoncés interprétatifs ; troisièmement, lorsque les prédictions que l'on peut formuler à partir de la conjonction de *T* et de *J* – en tant que conséquences logiques de la conjonction de ces deux systèmes d'énoncés que l'on peut exprimer dans les termes du vocabulaire *V_B* – sont falsifiées par des preuves empiriques, rien ne nous empêche de réajuster la théorie que nous avons reconstruite par le biais des systèmes *T* et *J* en modifiant le second plutôt que le premier, si bien qu'il est possible de concevoir les énoncés interprétatifs dont se constitue *J* comme étant de véritables axiomes de la théorie en question, au même titre que les énoncés dont se compose *T* (Hempel 1963, p. 703).

C'est précisément à partir de ces trois remarques que Hempel (1963) pouvait donc en conclure que « la distinction entre la théorie proprement dite [*the theory proper*], *T*, et son système interprétatif, *J*, est, dans une certaine mesure, une question de choix puisque les énoncés de ces deux ensembles ont essentiellement la même fonction et le même statut [*a somewhat arbitrary matter since the sentences of both sets have essentially the same function and the same status*] » (Hempel 1963, p. 703). Cela est d'autant plus vrai si l'on considère, comme le faisait Hempel (1954) lui-même, que les systèmes interprétatifs remplissent « deux fonctions du langage que l'on estime souvent être complètement distinctes » (« *two functions of language often considered as completely distinct* »), mais qui constituent, en fait, une seule et même fonction (Hempel 1954, p. 133). Il s'agit, plus précisément, de la « spécification de la signification » (« *specification of meaning* ») des termes dont se composent les énoncés proprement théoriques, d'une part, et de l'« affirmation de faits empiriques » (« *statement of empirical facts* »), d'autre part (Hempel 1954, p. 133). Une telle conclusion lui servait, néanmoins, de prémisse pour en tirer une conséquence ultérieure, qui s'éloigne nettement de la conception carnapienne de la reconstruction formelle du savoir et des théories scientifiques. Plus précisément, il en déduisait également que l'impossibilité de distinguer nettement ces deux fonctions linguistiques dans la reconstruction formelle des théories scientifiques rendrait vaine toute tentative de séparer les composantes synthétiques de ces dernières de leurs composantes analytiques, car il serait impossible d'identifier une quelconque signification analytique des énoncés scientifiques qui serait, justement, distincte de leur contenu factuel. C'est pourquoi, poursuivait Hempel (1954, 1963), il faudrait considérer que, dans le langage des sciences empiriques, il n'existerait pas deux classes distinctes de termes et d'énoncés, à savoir les termes et les énoncés qui auraient une « portée empirique » (« *experiential import* ») et ceux qui en seraient dépourvus, mais seulement des termes et des énoncés auxquels on pourrait assigner différents degrés de signification

empirique, en fonction de leur degré de proximité à l'expérience elle-même²¹⁶. Bien que la conclusion ultime de ses arguments soit en désaccord avec l'accent mis par Carnap (1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) sur l'importance de la distinction entre l'analytique et le synthétique, Hempel (1963) maintenait que sa conception holiste de l'interprétation empirique des théories scientifiques n'était, tout de même, rien d'autre qu'« une extension naturelle » (« *a natural extension* ») de la conception carnapienne de la reconstruction formelle du savoir (Hempel 1963, p. 703). Cela dit, est-ce qu'une telle considération est effectivement justifiée ? En d'autres termes, est-ce qu'il existerait effectivement un certain nombre de correspondances entre la conception holiste de l'interprétation des théories scientifiques, en tant que systèmes axiomatiques d'énoncés, que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) et la conception classique des théories scientifiques telle qu'elle a été développée par Carnap (1956a), notamment dans son article sur le caractère méthodologique des concepts théoriques ? Quelles conclusions au sujet des traits caractéristiques de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel pourrait-on tirer d'une telle comparaison entre les conclusions de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) et les arguments de Carnap (1956a) ?

²¹⁶ Comme l'écrivait, encore une fois, Hempel (1954) lui-même, « il se peut que le système interprétatif *M* qui introduit les termes [théoriques] en question soit tout simplement un ensemble d'énoncés ayant la forme de définitions explicites qui fournissent un équivalent observationnel pour chacun de ces mêmes termes [*a set of sentences in the form of explicit definitions that provide an observational equivalent for each of those terms*']. Dans ce cas, les termes qui sont introduits par *M* possèdent, pour ainsi dire, le degré maximal de signification empirique [*have maximal experiential significance, as it were*']. Dans un autre cas, *M* pourrait consister en énoncés de réduction pour les termes théoriques [*reduction sentences for the theoretical terms*']; de tels énoncés nous permettront de formuler, en termes d'observables, une condition nécessaire et une condition suffisante (différente de la première) pour l'application de chacun des termes ainsi introduits [*these will enable us to formulate, in terms of observables, a necessary and a (different) sufficient condition of application for each of the introduced terms*']. Il se peut, encore, que *M* contienne des énoncés qui ne servent de définitions ou d'énoncés de réduction que pour quelques-uns des termes non observationnels qui sont introduits par son intermédiaire [*sentences in the form of definitions or reduction sentences for only some of the nonobservational terms it introduces*']. En conclusion, il est possible qu'aucun des énoncés de *M* n'ait la forme d'une définition ou d'un énoncé de réduction ; et nonobstant cela, il se peut qu'une théorie dont les termes sont introduits par l'intermédiaire d'un système interprétatif de ce type soit susceptible d'être mise à l'épreuve par des résultats observationnels, et il se peut que, dans ce sens, le système que constituent les termes non observationnels de la théorie en question possède une portée empirique [*a theory whose terms are introduced by an interpretative system of this kind may well permit of test by observational findings, and in this sense, the system of its nonobservational terms may possess experiential import*'] » (Hempel 1954, p. 131-132).

3.2 Les liens entre la structure syntaxique du langage théorique des sciences empiriques et les critères de signification des termes qui en relèvent : une vision « holiste » de la conception classique des théories scientifiques ?

Pour répondre à de telles questions, nous pouvons remarquer, avant tout, que l'article de 1956 que nous venons d'évoquer ici, ainsi qu'un article successif, datant de 1958 et intitulé « *Beobachtungssprache und theoretische Sprache* » (« *Langage observationnel et langage théorique* »), sont particulièrement importants pour comprendre l'évolution de la conception carnapienne de la reconstruction formelle des théories scientifiques, ainsi que les possibles points de contact entre cette conception et celle que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965). Carnap (1956a, 1958) y présente, en effet, l'analyse de la structure syntaxique du langage formel dont on peut se servir pour reconstruire telle ou telle théorie scientifique comme étant une condition préalable à la résolution du problème de déterminer « un critère de signification » (« *a criterion of significance* ») (Carnap 1956a, p. 38) pour ce même langage, et notamment pour son volet théorique, L_T . Ces deux écrits marquent, par conséquent, l'éloignement de l'auteur par rapport à la théorie des critères de signification empirique qu'il avait lui-même développée dans *Testabilité et signification*. De plus, un tel éloignement semblerait aller, justement, dans le sens d'une prise en compte des critiques que Hempel (1950b, 1951, 1965) avait soulevées à l'encontre de cette théorie dans ses propres articles sur les critères empiristes de signification cognitive. Plus précisément, par « critère de signification (empirique) » pour un langage théorique donné, Carnap (1956a) entendait, au milieu des années 1950, « les conditions exactes [*exact conditions*'] que les termes et les énoncés du langage théorique doivent remplir afin de contribuer à expliquer et à prévoir [*have a positive function for the explanation and prediction*'] des événements observables, et donc afin qu'on puisse les accepter comme étant doués d'une signification empirique [*empirically meaningful*'] » (Carnap 1956, p. 38). C'est précisément en cela que consiste, en conséquence, le caractère méthodologique des concepts théoriques, et donc des termes qui y sont associés, dont parlait Carnap (1956a) dans son article de 1956 et qui en déterminerait, à son avis, le caractère logique. Autrement dit, d'après la définition même du concept de signification empirique que Carnap (1956a) avait fini par développer à cette date, le caractère logique des termes et des énoncés théoriques se définissait en fonction du rôle qu'ils étaient censés jouer dans la production et dans la systématisation de la connaissance scientifique, c'est-à-dire en fonction de leur caractère méthodologique. C'est ainsi que Carnap (1956a) pouvait en conclure que le contenu factuel des termes et des énoncés théoriques, c'est-à-dire leur composante synthétique, consisterait dans la manière dont ils permettraient de contraindre les représentations de la réalité qui se dégagent des observations empiriques. En résumé, c'est précisément en faisant

dépendre le caractère logique de ces mêmes termes et énoncés de leur caractère méthodologique, ou épistémologique, que Carnap (1956a, 1958) pouvait établir un lien explicite entre une question qui concerne la syntaxe de la conception classique des théories scientifiques (en tant que cadre métalinguistique et métathéorique) et l'analyse des critères de signification empirique de la science comme langage-système, empiriste et physicaliste, qu'il avait lui-même menée dans *Testabilité et signification*.

Comme nous l'avons rappelé plus haut, Carnap (1936b, 1937) était, en effet, parvenu à la conclusion que de tels critères se résumeraient à une exigence de confirmabilité (« *confirmability* »), c'est-à-dire à la conclusion que, dans un langage-système empiriste et physicaliste, il serait possible d'introduire tel ou tel prédicat descriptif, de telle sorte qu'il soit doué d'une signification empirique, à condition qu'on puisse le réduire à des prédicats observables ou à des prédicats réalisables, au moyen de chaînes d'énoncés ayant une forme logique particulière, dits, justement, « énoncés de réduction ». La raison en serait qu'un tel processus de réduction permettrait de confronter les énoncés où figure le prédicat en question à d'autres énoncés, qui décrivent les preuves empiriques susceptibles d'en augmenter ou d'en diminuer le degré de confirmation – en ceci qu'ils ne contiennent que des prédicats observables ou des prédicats réalisables –, et donc d'en déterminer les conditions de vérité, c'est-à-dire, conformément à la théorie vérificationniste de la signification telle que l'avait reformulée Carnap (1936b, 1937) lui-même, d'en déterminer la signification empirique. Dans les écrits plus tardifs que Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a consacrés à la question de la reconstruction formelle des théories scientifiques, et notamment dans les deux écrits qui nous intéressent plus particulièrement ici, cette exigence de confirmabilité par réduction à des classes de prédicats observables ou réalisables est donc remplacée par un autre critère de signification empirique. Il s'agit, plus précisément, d'un critère qui tient au rapport qui existe entre les énoncés de loi, de nature purement hypothétique, qui constituent le corps conceptuel d'une théorie donnée et les généralisations empiriques, ou plus généralement les énoncés empiriques, que ce même corps conceptuel vise à systématiser, à la fois déductivement et inductivement, pour reprendre la distinction de Hempel (1958, 1965). La thèse que nous défendons ici est, en conséquence, double. D'une part, elle consiste à affirmer que l'on pourrait interpréter l'évolution de la conception carnapienne des critères de signification des énoncés théoriques comme étant le produit d'une sorte de tournant méthodologique et épistémologique. Plus précisément, un tel tournant se serait traduit par l'importance croissante que Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par attribuer au rôle des théories scientifiques, en tant que systèmes axiomatiques associés à des systèmes interprétatifs, dans la construction du savoir. D'autre part, elle consiste, également, à affirmer que c'est précisément à la lumière d'un tel tournant épistémologique et méthodologique qu'il

faut considérer la manière dont Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a développé ses analyses de la structure syntaxique des langages des sciences empiriques en tant que langages formalisés, ainsi que de la structure et du contenu des théories scientifiques elles-mêmes, dans le but de séparer leur contenu conceptuel de leur contenu empirique. Faire cela signifie, en effet, distinguer la signification empirique et synthétique des termes et des énoncés que contiennent les théories en question de leur signification analytique. Il en découle que c'est précisément en analysant un tel tournant que nous pouvons mettre en valeur les points de contact qui existent entre la manière dont Carnap (1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a développé la conception classique des théories scientifiques entre 1956 et 1966, d'une part, et la conception de la reconstruction formelle de ces mêmes théories qu'a formulée, presque en même temps, Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), d'autre part. Mais en quoi consiste, par conséquent, la vision de la structure syntaxique du langage formel L , dont la conception classique préconise l'usage pour reconstruire telle ou telle théorie, qui a découlé d'un tel tournant méthodologique et épistémologique ?

En ce qui concerne la structure du volet observationnel du langage L , Carnap (1956a) précisait que les termes descriptifs de L_O et du calcul associé K_O sont supposés recevoir une « *interprétation sémantique* » (« *semantic interpretation* ») directe qui consiste à fixer des règles de référence explicite, du type « le signe 'P' désigne la propriété d'être bleu » (« *the sign 'P' designates the property of being blue'* ») (Carnap 1939, p. 62). Comme nous l'avons remarqué dans le chapitre précédent, contrairement à ce qui vaut pour le langage (théorique) L_T , ce sont, en effet, les termes primitifs de L_O – c'est-à-dire des termes primitifs qui relèvent d'un langage d'observation et qui dénotent directement des objets, des propriétés ou des relations observables – qui déterminent, de manière exhaustive, le sens des énoncés dans lesquels ils apparaissent, et non pas l'inverse. Il s'ensuit que cette double caractéristique sémantique du langage d'observation (c'est-à-dire le fait qu'il soit directement et entièrement interprété) présuppose une certaine syntaxe logique, et plus précisément l'existence d'un certain nombre de contraintes syntaxiques qui déterminent les propriétés formelles des termes d'observations – en identifiant, par exemple, les types de signes qui peuvent être utilisés comme termes de L_O –, ainsi que les relations logiques qu'ils entretiennent les uns avec les autres et qui permettent de s'en servir pour formuler des énoncés d'observation. Plus précisément, comme l'explique Carnap (1956a) lui-même, l'on peut identifier six contraintes fondamentales qui s'appliquent à L_O , en plus de celle qui consiste en ceci qu'un tel (sous)langage formel devrait contenir les termes, les prédicats et les relations qui caractérisent la logique des prédicats du premier ordre. De telles contraintes sont, notamment, les suivantes :

1. Condition d'observabilité [*'observability'*] en ce qui concerne les termes descriptifs primitifs [c'est-à-dire les termes non logiques qui sont admis dans L_0 sans qu'il soit nécessaire de les définir par rapport à d'autres termes].
2. [Exigence de] définissabilité explicite [*'explicit definability'*] [ou de] réductibilité au moyen de définitions conditionnelles [*'reducibility by conditional definitions'*] [pour tous les termes descriptifs de L_0 qui ne sont pas primitifs].
3. Exigence de nominalisme [*'nominalism'*] : les valeurs des variables doivent être des entités concrètes et observables²¹⁷ (par exemple, des événements, des choses ou des choses-instants [*'thing-moments'*] observables).
4. Exigence de finitisme [*'finitism'*], [quoique dans sa forme la plus faible] : Les règles syntaxiques du langage L_0 n'affirment ou n'impliquent pas que son domaine de base (le parcours des valeurs [*'range of values'*] d'une variable individuelle de ce même langage [c'est-à-dire la gamme des valeurs qu'elle peut prendre]) soit infini. En termes techniques, L_0 possède au moins un modèle [au sens d'Alfred Tarski (1936, 1956)] qui soit fini²¹⁸.

²¹⁷ Il faut remarquer, encore une fois, que Carnap (1966) utilisait le terme « observable » (« *observable* ») dans deux sens différents. Plus précisément, dans des ouvrages tels que *Foundations of Logic and Mathematics* ou *Testabilité et signification*, Carnap (1936b, 1937, 1939) se sert de ce mot dans son sens, pour ainsi dire, « philosophique », c'est-à-dire « dans un sens très étroit » (« *very narrow meaning* ») du terme, « pour désigner des qualités sensibles que l'on perçoit directement » (« *properties directly perceived by the senses* »), telles que les propriétés qualitatives que désignent les termes « bleu », « dur », « chaud », etc. Dans les articles que nous sommes en train d'analyser ici, en revanche, Carnap (1956a, 1958, 1961, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) utilise le terme « observable » dans le même sens dans lequel l'utilisent les physiciens, c'est-à-dire « dans un sens beaucoup plus large » (« *much broader meaning* »), qui « comprend toute grandeur quantitative qu'il est possible de mesurer d'une façon relativement simple et directe » (« *any quantitative magnitude that can be measured in a relatively simple, direct way* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 219).

²¹⁸ Comme le rappelle Herbert B. Enderton (2001), un modèle, au sens de Tarski (1936, 1956), d'un énoncé ou d'un ensemble d'énoncés (et donc, éventuellement, d'une théorie en tant que système axiomatique d'énoncés) formulé dans un langage de la logique des prédicats d'un ordre égal ou supérieur au premier n'est rien d'autre qu'une « *structure* » (« *structure* ») particulière de ce même langage. Plus précisément, pour un langage formel donné, une structure se définit comme étant un ensemble ordonné d'éléments « qui peut être conçu comme fournissant [un] dictionnaire permettant de traduire » (« *which can be thought of as providing [a] dictionary for translations* ») tel ou tel énoncé de ce même langage formel en un énoncé d'un langage naturel tel que l'anglais ou le français (Enderton 2001, p. 80). Il s'agit, par conséquent, d'un ensemble de règles qui nous disent « 1. Quelle est la collection de choses [*'collection of things'*] à laquelle fait référence le symbole du quantificateur universel (\forall) » et « 2. Ce que dénotent les autres paramètres (les symboles de prédicats et de fonctions) » que contient le langage formel en question. En termes plus formels, une structure \mathfrak{A} d'un langage de la logique des prédicats du premier ordre se définit comme étant « une fonction [au sens mathématique du

terme] dont le domaine consiste dans un ensemble de paramètres [*'a function whose domain is the set of parameters'*], et qui est telle que :

1. \mathfrak{A} attribue au symbole du quantificateur universel \forall un ensemble non vide $|\mathfrak{A}|$ que l'on appelle l'*univers* (ou *domaine*) de \mathfrak{A} .
2. \mathfrak{A} attribue à chaque symbole de prédicat à n -places P une relation n -aire $P^{\mathfrak{A}} \subseteq |\mathfrak{A}|^n$; c'est-à-dire un ensemble $P^{\mathfrak{A}}$ de n -uplets d'éléments de l'univers de \mathfrak{A} , $|\mathfrak{A}|$.
3. \mathfrak{A} attribue à chaque symbole de constante c un élément $c^{\mathfrak{A}}$ de l'univers $|\mathfrak{A}|$.
4. \mathfrak{A} attribue à chaque symbole de fonction à n places f une opération n -aire $f^{\mathfrak{A}}$ sur $|\mathfrak{A}|$, c'est-à-dire [une fonction au sens mathématique du terme] $f^{\mathfrak{A}} : |\mathfrak{A}|^n \rightarrow |\mathfrak{A}|$.

L'idée sous-jacente à cette définition est que \mathfrak{A} attribue une signification aux paramètres [*'assigns meaning to the parameters'*] du langage en question. Le symbole \forall doit être considéré comme signifiant 'pour tout élément de $|\mathfrak{A}|$ '. Le symbole c doit être regardé comme dénotant l'élément $c^{\mathfrak{A}}$. La formule atomique $Pt_1 \dots t_n$ doit être considérée comme signifiant que les éléments du n -uplet que constituent les n membres de $|\mathfrak{A}|$ qui sont dénotés par les symboles t_1, \dots, t_n entretiennent, les uns avec les autres, la relation $P^{\mathfrak{A}}$ », c'est-à-dire comme signifiant que le n -uplet en question appartient à l'ensemble de n -uplets que désigne précisément le symbole de relation $P^{\mathfrak{A}}$ (Enderton 2001, p. 80-81). Pour donner un exemple concret, considérons un langage formel de la théorie des ensembles qui ne contient aucun autre paramètre non logique (c'est-à-dire, dans ce contexte particulier, aucun autre paramètre qui relève de la logique des prédicats du premier ordre) que le symbole « \in ». Considérons, ensuite, « la structure \mathfrak{A} telle que

$|\mathfrak{A}| =$ l'ensemble des nombres naturels,

$\in^{\mathfrak{A}} =$ l'ensemble des couples [de nombres naturels] $\langle m, n \rangle$ tels que $m < n$.

(Nous traduisons ainsi \in par 'est plus petit que') » (Enderton 2001, p. 81). Une telle structure nous permet, en conséquence, de traduire toute formule du langage formel en question en une phrase de la langue française. En d'autres termes, la structure \mathfrak{A} que nous venons de définir nous permet, par exemple, de traduire la formule « $\exists x \forall y (\neg y \in x)$ », du langage de la théorie des ensembles que nous sommes en train de considérer, par la phrase de la langue française « il n'existe aucun nombre naturel x tel que tous les autres nombres naturels y soient plus petits que ce dernier ». Ainsi traduite, la formule « $\exists x \forall y (\neg y \in x)$ » est donc vraie par rapport à l'univers ou domaine d'objets, $|\mathfrak{A}|$, auquel elle fait référence, c'est-à-dire, justement, l'ensemble des nombres naturels. Nous pouvons en conclure que \mathfrak{A} est une structure du langage formel que nous sommes en train d'utiliser qui fournit une traduction vraie de la formule « $\exists x \forall y (\neg y \in x)$ », en tant qu'énoncé de ce même langage formel. C'est précisément pour une telle raison que l'on peut considérer la structure \mathfrak{A} comme étant un « modèle » (« model ») de l'énoncé « $\exists x \forall y (\neg y \in x)$ », mais non pas, par exemple, de « l'axiome de la paire » (« pair-set axiom ») de la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel, c'est-à-dire l'axiome « $\forall x \forall y \exists z \forall t [t \in z \leftrightarrow (t = x \vee t = y)]$ ». La raison en est, précisément, que la traduction de cet axiome, dans la langue française, que fournit une telle structure est fautive, du moment qu'il n'existe aucun nombre naturel m tel que, pour tout autre nombre naturel n , $n < m$ si et seulement si $n = 1$ (Enderton 2001, p. 81). Un modèle fini d'un langage tel que L_0 n'est, en

5. Exigence de constructivisme [*'constructivism'*] : chaque valeur d'une variable quelconque de L_0 n'est désignée que par une expression de L_0 .
6. Exigence d'extensionnalité [*'extensionality'*]. Le langage ne contient que des connecteurs vérifonctionnels [c'est-à-dire des connecteurs qui permettent de former des énoncés complexes dont la valeur de vérité est une fonction des valeurs de vérité des énoncés atomiques qui les composent], et aucun terme de modalité logique ou causale (nécessité, possibilité, etc.)

(Carnap 1956, p. 41). La fonction de toutes ces contraintes consiste, en conséquence, à garantir le fait que le langage L_0 soit « plus directement et plus complètement compréhensible » (« *more directly and more completely understandable* ») (Carnap 1956, p. 41) que tous les langages qui ne satisfont pas ces mêmes exigences, puisqu'elles font en sorte qu'on puisse interpréter les termes qui composent L_0 comme étant des termes qui désignent directement des objets, des propriétés ou des relations empiriques, voire qui sont directement définissables en fonction de termes d'une telle nature, ou entièrement réductibles à ces derniers. Mais comment s'opérerait donc, toujours selon Carnap (1956a), l'interprétation de l'autre sous-langage de L , c'est-à-dire L_T , et quelle syntaxe logique particulière implique-t-elle ? De plus, en quoi le système interprétatif qui est associé à un tel langage constituerait-il un critère de signification pour les termes théoriques des sciences empiriques ? En quoi se prêterait-il au développement d'une vision holiste de l'interprétation partielle des théories scientifiques, et donc de la conception classique des théories scientifiques, qui serait semblable à celle que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) ? De quelle manière cette vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, ou du moins de la conception classique telle que la présente Carnap (1956a, 1958) dans les deux articles qui nous intéressent tout particulièrement ici, pourrait-elle nous aider à comprendre en quoi cette dernière constituerait non seulement un cadre métalinguistique et métathéorique, mais également un cadre conceptuel ? En quoi consistent les problèmes qu'elle soulève, en retour ?

Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier temps (3.2.1), en quoi Carnap (1956a, 1958) définissait la structure syntaxique du (sous)langage théorique L_T de telle sorte que ce dernier puisse contenir toute l'ontologie que nécessitent les théories scientifiques, c'est-à-dire qu'il soit à même de représenter toutes les entités, les propriétés et les relations physiques ou mathématiques qui en font l'objet. Nous verrons, plus précisément, que cette structure, telle que l'envisageait Carnap (1956a, 1958) lui-même, se compose de deux volets : en premier lieu, elle se

conséquence, rien d'autre qu'une structure de ce même langage qui fournit une traduction vraie pour tous les énoncés que l'on peut formuler au moyen de ce dernier et dont le domaine est un ensemble qui contient un nombre fini d'éléments.

compose d'un volet mathématique, qui prend la forme d'une « théorie des types dite 'simple' » (« *simple type theory* ») (Church 1940) ; en second lieu, elle se compose d'un volet proprement théorique, qui consiste dans un ensemble de « schémas conceptuels généraux » (« *allgemeine Begriffsschemata* ») (Carnap 1958), c'est-à-dire de variables et de fonctions propositionnelles, d'ordre supérieur au premier, qu'il est possible d'établir en se servant de la base logico-mathématique de L_T , ainsi que des termes descriptifs de L_O , qui désignent, de manière directe, des entités, des propriétés et des relations observables. En tant que schémas conceptuels, ces termes sont définis au moyen de deux classes de postulats, à savoir des « postulats théoriques » (« *theoretische Postulate* », « *theoretical postulates* ») (**T**) et des « postulats de correspondance » (« *Korrespondenzpostulate* », « *correspondence postulates* ») (**C**) (Carnap 1956a, 1958), et ils désignent des entités qui sont de nature logico-mathématique – tels les nombres, les classes de nombres, les classes de classes de nombres, etc. – mais qui demeurent, tout de même, physiquement caractérisées, puisqu'elles ne sont, en elles-mêmes, rien d'autre que des « constructions syntaxiques » (« *syntactic constructs* ») (Nagel 1950 ; Psillos 1999), qui se fondent sur des représentations d'entités, de propriétés et de relations directement observables. Par conséquent, c'est précisément sur la base de cette caractérisation de la structure syntaxique du langage L_T que Carnap (1956a) a pu définir un critère de signification empirique pour les termes théoriques, en tant que schémas conceptuels, que l'on pourrait qualifier de « méthodologique », ou « épistémologique », puisqu'il se résume à une explicitation des conditions (logiques) qui permettent de déterminer si tel ou tel terme contribue positivement à la fonction de systématisation des connaissances empiriques qui est propre aux théories scientifiques. Autrement dit, ce critère vise à déterminer si le terme en question permet, à l'aide de postulats théoriques, de postulats de correspondance et d'autres termes théoriques, de déduire des conséquences empiriques de la théorie où il figure que l'on ne pourrait plus dériver s'il était remplacé par un autre terme. Cela dit, quels sont les points de contact que l'on pourrait identifier entre une telle représentation de la structure logique et de la signification empirique des théories scientifiques, d'une part, et l'interprétation holiste de la conception classique des théories scientifiques que nous avons attribuée à Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), d'autre part ? C'est ainsi que, dans un deuxième temps (3.2.2), nous verrons en quoi une analyse des points de concordance que l'on peut identifier entre les vues de Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et celles de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) nous permet de formuler une possible interprétation holiste de la conception classique des théories scientifiques qui s'appuie sur trois conclusions fondamentales. Premièrement, l'idée que le système de postulats (théoriques ou interprétatifs), **TC**, qui est au fondement de toute théorie qui est reconstruite sous la forme d'un calcul partiellement interprété, constituerait un « bloc unique », pour ainsi dire ; Deuxièmement, l'idée que ce même système de

postulats remplirait deux fonctions fondamentales : d'une part, une fonction qui consiste à interpréter (quoique de manière partielle) un ensemble de termes théoriques par rapport à un ensemble de termes observationnels ; d'autre part, une fonction qui consiste à systématiser la connaissance empirique et qui aboutirait à la production de nouveaux contenus factuels. Troisièmement, l'idée qu'il serait impossible de distinguer le caractère logique des postulats C de celui des postulats T , afin de trancher la question de savoir laquelle de ces deux classes de postulats représenterait le contenu empirique de la théorie en question et laquelle en représenterait, au contraire, le contenu conceptuel. Dans une telle perspective, il serait nécessaire d'en conclure que la conjonction TC « nous livre donc des énoncés synthétiques » (Carnap 1966 ; 1973, p. 259-260). Nous montrerons, en outre, en quoi une telle interprétation holiste de la conception classique nous permet d'envisager cette dernière comme étant non seulement un cadre métathéorique, mais également un cadre conceptuel, et plus précisément un « schéma de pensée » dans le sens que Quine (1960) attribuait à ce terme. Plus précisément, nous verrons en quoi la conception classique consiste, en tant que schéma de pensée, dans un contexte théorique qui prend la forme d'un réseau de termes de nature différente (théorique ou observationnelle) et qui impose à la structure et au contenu des théories scientifiques des contraintes qui sont, respectivement, ontologiques, épistémologiques et cognitives. En particulier, les contraintes que nous qualifions ici de « cognitives » tiennent à la nature des concepts que représentent les termes théoriques du langage L_T , en ceci que la conception classique des théories scientifiques permet de les envisager comme étant des concepts ouverts, c'est-à-dire comme étant des constructions logiques dont la fonction consiste à organiser les contenus factuels qui nous livrent les énoncés du langage L_O . Ainsi interprétée, la conception classique des théories scientifiques soulève, par conséquent, la question suivante : est-ce qu'une la double fonction d'organisation et de systématisation des connaissances empiriques qu'exercent les théories scientifiques nécessite effectivement l'emploi d'expressions et de termes théoriques – tels que ceux dont se compose, justement, le langage L_T ?

3.2.1 Qu'est-ce qu'un langage théorique ? Le formalisme des langages des sciences empiriques comme théorie (simple) des types et la nature méthodologique de leurs critères de signification

Afin d'analyser la structure syntaxique du langage théorique L_T , il faut avant tout remarquer que, contrairement à L_O et K_O , L_T et K_T reçoivent une « *interprétation partielle* » (« *partial interpretation* ») et indirecte, en ceci que les référents des termes et les valeurs de vérité des énoncés qui relèvent de L_T ne sont pas déterminés par une relation directe avec un domaine d'objets empiriques, mais par l'intermédiaire de deux ensembles de postulats, à savoir les « *postulats théoriques* » (« *theoretical postulates* »), T , et les « *règles de correspondance* » (« *correspondence* »)

rules ») ou « *postulats de correspondance* » (« *correspondence postulates* »), **C**. En effet, cela découle directement du fait que, du moins tel que la décrivait Carnap (1956a), la structure logique du langage L_T n'est sujette à aucune contrainte syntaxique particulière, puisqu'un tel langage doit être le plus riche possible, dans le but de restituer de manière exhaustive l'ontologie de la théorie que l'on est en train de formaliser. C'est pour cette même raison que, toujours dans son article sur le caractère méthodologique des termes théoriques, Carnap (1956a) exprime également l'exigence que le domaine de référence du langage L_T contienne « toutes les mathématiques qui sont nécessaires dans les sciences » (« *all of mathematics that is needed in science* ») (Carnap 1956a, p. 43), et notamment « les expressions et les variables qui servent à désigner tous les objets que l'on trouve dans les mathématiques classiques » (« *Ausdrücke und Variablen für alle Gegenstände, die in der klassischen Mathematik vorkommen* ») (Carnap 1958, p. 238)²¹⁹, « ainsi que toutes les espèces d'entités que l'on trouve d'habitude dans chaque branche des sciences empiriques » (« *and also all kinds of entities that customarily occur in any branch of empirical science* ») (Carnap 1956, p. 43). C'est pourquoi Carnap (1958) précisait également que tout langage théorique, comme L_T , se compose, à son tour, de deux volets, à savoir « le langage de la mathématique » (« *die mathematische Sprache* ») et « le langage de la science théorique » (« *die Sprache der theoretischen Wissenschaft* ») (Carnap 1958, p. 237-243). En ce qui concerne le langage de la mathématique, Carnap (1956a, 1958) se limitait à énoncer trois postulats conventionnels C_1 , C_2 et C_3 qui définissent le domaine D des entités que l'on peut considérer comme étant des valeurs possibles des variables qui peuvent apparaître dans les termes mathématiques de L_T :

C1. D contient un sous-domaine d'entités, *I*, qui est dénombrable [*'a denumerable subdomain'*].

C2. Tout *n*-uplet ordonné d'entités [*'any ordered n-tuple of entities'*] de *D* (pour tout [entier naturel] *n* fini) appartient également à *D*.

C3. Toute classe d'entités [*'any class of entities'*] de *D* appartient également à *D*

(Carnap 1956a, p. 43). Cela implique que D contient « une séquence infinie de domaines » (« *eine unendliche Folge von Bereichen* »), c'est-à-dire une séquence infinie de classes d'entités D^0, D^1, \dots, D^n , ce qui confère au langage L_T la structure d'un « système logique d'ordre supérieur au premier » (« *Stufenlogik* ») (Carnap 1958, p. 237), et plus précisément la structure d'une « théorie des types »

²¹⁹ « Les nombres des différentes classes (les nombres naturels, entiers, rationnels, réels et complexes), les relations entre nombres, les fonctions numériques, etc. » (« *die Zahlen der verschiedenen Arten (natürliche, ganze, rationale, reelle und komplexe Zahlen) die Relationen zwischen Zahlen, Funktionen von Zahlen, usw.* ») (Carnap 1958, p. 238).

(« *typetheoretic logic* ») (Psillos 1999, p. 39). Contrairement à celle de la théorie des types qu'établissent Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) dans les *Principia Mathematica*, la structure logique de L_T , telle que la présentait Carnap (1956a, 1958), n'est cependant pas ramifiée, en ceci qu'elle ressemble davantage à celle d'une extension transfinie des différentes « théories des types dites 'simples' » (« *simple theories of types* ») qui ont été proposées par Leon Chwistek (1921, 1922), Ramsey (1926, 1931), Gödel (1931), Tarski (1935a) et Alonzo Church (1940)²²⁰, comme l'on peut facilement constater si l'on s'intéresse à l'interprétation de L_T en tant que langage purement mathématique.

En effet, comme le postulat *C1* stipule que le sous-domaine I de D est dénombrable, nous pouvons l'interpréter, de manière intuitive, en l'associant à l'ensemble des entiers naturels \mathbb{N} (Carnap 1956a, p. 43). Ensuite, les postulats *C2* et *C3* nous permettent d'en conclure que toute relation, R , entre des éléments de I , en tant que classe de n -uplets finis et ordonnés d'éléments de ce même ensemble, appartient également à D . C'est ainsi que, à partir du sous-domaine I considéré comme étant le type, D^0 , des valeurs des variables mathématiques de L_T qui représentent les entiers naturels, nous pouvons construire le type, D^1 , des valeurs des variables mathématiques de L_T qui représentent les entiers relatifs, \mathbb{Z} , puisque ces derniers se définissent, précisément, comme étant des classes qui correspondent à autant de « relations entre entiers naturels » (« *relations of natural numbers* ») (Carnap 1956a, p. 43). Plus précisément, le type D^1 peut être construit comme étant le domaine qui se compose de toutes les sous-classes (ou de tous les sous-ensembles) de D^0 que l'on obtient en

²²⁰ Plus précisément, la structure typée du langage L_T , telle que l'envisageait Carnap (1956a, 1958), ressemble à celle que décrit ici Thierry Coquand (2018) : « Nous avons des objets de type 0, pour les individus [*'individuals'*], des objets de type 1, pour les classes d'individus [*'classes of individuals'*], des objets de type 2, pour les classes de classes d'individus [*'classes of classes of individuals'*], et ainsi de suite. De même que pour les relations, il n'est pas nécessaire d'inclure les fonctions de deux ou de plusieurs variables [*'functions of two or more arguments'*] parmi les objets primitifs [*'primitive objects'*] du système logique en question, puisque l'on peut définir les relations comme étant des classes de paires ordonnées [*'one can define relations to be classes of ordered pairs'*], et les paires ordonnées comme étant des classes de classes [*'ordered pairs to be classes of classes'*]. Par exemple, l'on peut définir la paire ordonnée d'individus a, b comme étant une classe de classes de la forme $\{\{a\}, \{a, b\}\}$, où $\{x, y\}$ dénote la classe dont les seuls éléments sont x et y [*'the class whose sole elements are x and y '*] ... Dans un tel système, tous les énoncés ont la forme $a(b)$, où a est un signe de type $n + 1$ et b est un signe de type n . Par conséquent, un tel système est construit sur l'idée qu'il existe une classe ou un sous-ensemble quelconque d'objets d'un certain domaine [*'an arbitrary class or subset of objects of a given domain'*] et sur le fait que la collection de *tous les sous-ensembles* du domaine en question peut constituer un nouveau domaine du type [hiérarchiquement] successif [*'the collection of all subsets of the given domain can form a new domain of the next type'*] » (Coquand 2018). C'est ainsi que, en partant d'un domaine de base et en itérant un tel processus, l'on peut construire une suite transfinie de domaines de niveau (de type) croissant D^0, D^1, \dots, D^n .

faisant une partition des membres de ce dernier d'après les relations entre entiers naturels qui permettent de définir les entiers relatifs. Nous pouvons donc en conclure que D^0 constitue effectivement un type des variables mathématiques de L_T qui est d'un niveau d'ordre inférieur à celui du domaine D^1 , dans le sens du terme que nous avons défini plus haut (Whitehead & Russell 1910, 1912, 1913 ; Myhill 1974). De manière analogue, c'est précisément à partir de D^1 que nous pouvons construire le type, D^2 , des valeurs des variables mathématiques de L_T qui représentent les nombres rationnels, \mathbb{Q} , puisque les nombres rationnels se laissent définir, à leur tour, en termes de relations entre entiers relatifs. Il en découle que le type D^2 , ainsi construit, n'est rien d'autre que le domaine qui se compose de toutes les sous-classes de D^1 que l'on obtient en faisant une partition des membres de ce dernier d'après les relations entre entiers relatifs qui permettent de définir les nombres rationnels, si bien que D^1 peut être considéré, à son tour, comme étant un type des valeurs possibles des variables mathématiques de L_T qui est hiérarchiquement inférieur au type que l'on peut associer au domaine D^2 . Par la même opération, nous pouvons ensuite construire le type, D^3 , des valeurs des variables mathématiques de L_T qui représentent les nombres réels, \mathbb{R} – en tant que classes de classes de nombres rationnels, selon la définition de Richard Dedekind (1872) –, le type, D^4 , des valeurs des variables mathématiques de L_T qui représentent les fonctions réelles à valeurs réelles (en tant que classe d'un type particulier de relations entre nombres réels), et ainsi de suite (Carnap 1956, p. 43). Par conséquent, c'est en itérant une seule et même opération que l'on peut construire, au sein du domaine D de L_T , une hiérarchie transfinie – car isomorphe à la suite des ordinaux transfinis de Cantor (1883) – de types simples D^0, D^1, \dots, D^n , où chaque valeur possible d'une variable mathématique de L_T appartient à un seul et unique « niveau de type » (« *type-level* ») n (Psillos 1999) et où chaque type de niveau $n + 1$ n'est rien d'autre que la classe de toutes les sous-classes que l'on peut construire en répartissant les objets qui relèvent du type de niveau n d'après une certaine relation d'équivalence. C'est précisément dans ce sens que le langage L_T , tel que le définit Carnap (1956a, 1958), contient tous les objets mathématiques qui apparaissent dans les théories des sciences empiriques. Cela dit, faudrait-il en conclure que la manière dont Carnap (1956a, 1958) présentait la structure syntaxique du langage L_T , du moins en ce qui concerne son volet mathématique, impliquerait une conception « platoniste » (Linnebo 2018), et donc réaliste²²¹, de ces mêmes objets ?

²²¹ « Le platonisme dans le domaine des mathématiques (ou *platonisme mathématique*) [*mathematical platonism*] est la conception métaphysique [*metaphysical view*] d'après laquelle il existe des objets mathématiques abstraits dont l'existence est indépendante de nous et de notre langage, de nos pensées et de nos pratiques [*that there are abstract mathematical objects whose existence is independent of us and our language, thought, and practices*]. Tout comme les électrons et les planètes, les nombres et les ensembles existent indépendamment de nous. Et tout comme ce sont les électrons et les planètes, ainsi que leurs propriétés parfaitement objectives [*perfectly objective properties*], qui rendent

La réponse que Carnap (1958) a lui-même apportée à une telle question, en s'appuyant encore une fois sur le principe de tolérance syntaxique et sur le principe de tolérance sémantique dont nous avons parlé plus haut, est clairement négative. Introduire des termes (variables et constantes) mathématiques dans un certain langage théorique, L_T , écrivait-il, signifie tout simplement y introduire des expressions (« *Ausdrücke* ») dont on peut se servir pour construire un « calcul (logique) non interprété » (« *ungedeuteter Kalkül* »), sur la base d'un certain nombre de règles syntaxiques (« *syntaktische Regeln* ») qu'il est possible de formuler, dans un métalangage syntaxique élémentaire (« *ein elementare syntaktische Metasprache* »), sans rien présumer « au sujet de l'existence' (au sens métaphysique) [des] objets [que désignent ces mêmes termes] » (« *über die 'Existenz' (im metaphysischen) Sinn solcher Gegenstände* ») (Carnap 1958, p. 238). De plus, Carnap (1958) précisait aussi qu'il était possible de se servir, à cet effet, d'un métalangage logiquement élémentaire, dont la structure serait semblable à celle du sous-langage observationnel L_O tel que nous l'avons défini plus haut, c'est-à-dire d'un métalangage qui remplisse les conditions « finitistes », dans le sens du terme que nous avons précisé dans le chapitre précédent, qu'exigeaient non seulement une vision formaliste de la construction de calculs logico-mathématiques (Hilbert 1923 ; Bernays 1938, 1957), mais également « une conception intuitionniste, constructiviste, voire nominaliste » (« *eine intuitionistische, eine konstruktivistische oder sogar eine nominalistische Auffassung* ») de la pensée mathématique elle-même (Carnap 1958, p. 238). Un tel langage permet, en effet, aussi bien de définir un ensemble de règles syntaxiques que d'établir une « sémantique élémentaire » (« *elementare Semantik* ») (Carnap 1958, p. 238) pour la composante mathématique du langage L_T – soit de manière directe et constructive (comme le suggéraient les intuitionnistes), soit indirectement, en démontrant la « consistance » (« *Widerspruchsfreiheit* ») (Carnap 1958, p. 240) du système non interprété en question (comme l'avançaient les formalistes) – de telle sorte que l'on puisse considérer les formules qui en relèvent comme étant « douées de signification au sens large du terme » (« *sinnvoll in einem weiteren Sinn* ») (Carnap 1958, p. 238). Deux problèmes se posent, néanmoins, à ce sujet, comme le relevait, encore une fois, Carnap (1958) lui-même. Le premier problème consiste en ceci que, afin que l'on puisse interpréter langage L_T de telle manière qu'il contienne « les innombrables résultats concernant les nombres réels, ainsi que leurs ensembles et leurs fonctions » qui ont été obtenus par les mathématiciens « au cours de siècles de travail » (« *dass in jahrhundertelanger Arbeit zahlreiche Ergebnisse, etwa über reelle Zahlen und Mengen und Funktionen von solchen, gefunden worden*

vrais ou faux les énoncés qui portent sur ces mêmes objets et ces mêmes propriétés, ce sont les nombres et les ensembles, ainsi que leurs propriétés, qui rendent vrais ou faux les énoncés mathématiques. Les vérités mathématiques sont, par conséquent, découvertes, et non pas inventées [*'Mathematical truths are therefore discovered, not invented'*] » (Linnebo 2018).

sind ») (Carnap 1958, p. 239), il est nécessaire d'accepter des « présupposés » (« *Voraussetzungen* »), de nature sémantique, qui sont beaucoup plus contraignants que ceux qu'étaient prêts à accepter les formalistes et les intuitionnistes. Plus précisément, de tels présupposés sont les suivants :

[CS1.] Tous les énoncés [*'Allsätze'*] qui portent sur les éléments de D^0 sont doués de sens [*'sinnvoll'*].

[CS2.] Si tous les énoncés qui portent sur un certain domaine d'objets sont doués de sens, le sont également tous les énoncés qui font référence à des classes qui se composent de ces mêmes objets [*'Wenn Allsätze über irgend einen Bereich von Gegenständen sinnvoll sind, so auch Allsätze, die sich auf Klassen solcher Gegenstände beziehen'*].

[CS3.] La conjonction de deux énoncés doués de sens est elle-même douée de sens ; la négation d'un énoncé doué de sens est elle-même douée de sens [*'Die Konjunktion zweier sinnvoller Sätze ist sinnvoll; die Negation eines sinnvollen Satzes ist sinnvoll'*]

(Carnap 1958, p. 239). L'autre problème consiste, au contraire, en ceci que, comme l'ont montré Gödel (1931) et Gerhard Gentzen (1936), il est impossible de démontrer la consistance d'un système formel qui contienne, tout au moins, l'arithmétique élémentaire en se limitant à utiliser les règles d'inférence qui sont propres à l'arithmétique élémentaire elle-même. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir recours à « des moyens déductifs nouveaux (« *neue deduktive Mittel* »), qui sont, néanmoins, « eux-mêmes d'autant moins sûrs que le calcul est plus complet » (« *die selbst umso unsicherer sind, je umfassender der Kalkül ist* ») (Carnap 1958, p. 240).

En conséquence, c'est précisément à la lumière de ces deux problèmes que Carnap (1958) pouvait en conclure que, tout comme les physiciens, les mathématiciens se verraient contraints de faire face à « l'impossibilité de la certitude absolue » (« *die Unmöglichkeit von absoluter Gewissheit* ») (Carnap 1958, p. 240), puisqu'il se pourrait toujours que les conséquences logiques que l'on peut tirer d'un certain « calcul mathématique supérieur » (« *higher mathematical calculus* ») (Carnap 1939) soient contredites par tel ou tel objet que l'on peut construire, voire par telle ou telle propriété que l'on peut énoncer, par l'intermédiaire d'un langage mathématique élémentaire, c'est-à-dire d'un langage qui ne soit pas plus puissant que les langages de la logique des prédicats du premier ordre. En ce sens, l'on peut considérer qu'un tel langage mathématique élémentaire constitue la base observationnelle du calcul mathématique supérieur en question, de même que le langage L_0 constitue la base observationnelle du système d'énoncés que l'on peut formuler au moyen de L_T , sans qu'il ne soit pour autant possible d'établir, entre les mathématiques et la physique, autre chose qu'une simple

« analogie éloignée » (« *entfernte Analogie* ») (Carnap 1958, p. 240), comme le rappelait, d'ailleurs, Carnap (1958) lui-même. En effet, alors que l'« intuition logico-mathématique » (« *logisch-mathematische Intuition* ») consiste à « saisir une relation conceptuelle » (« *die Erfassung einer begrifflichen Beziehung* »), c'est-à-dire une relation formelle telle que celles qu'expriment les propositions de structure que nous avons analysées lorsque nous avons parlé de *La Construction logique du monde*²²², l'« observation » (« *Beobachtung* ») physique a pour objet « une relation factuelle entre des objets perçus » (« *eine faktische Beziehung zwischen wahrgenommenen Gegenständen* ») (Carnap 1958, p. 240), c'est-à-dire « une relation qui se fonde sur des connexions causales » (« *relation based on causal connections* ») (Carnap 1963, p. 924-925) entre des états ou des processus physiques, et notamment entre des états physiques internes (en tant qu'états mentaux) du sujet qui sont le reflet perceptif d'états physiques d'objets extérieurs. Ces observations de Carnap (1958) nous permettent, ainsi, de mieux clarifier en quoi consistent les solutions que ce dernier a apportées aux deux problèmes que le formalisme hilbertien avait légués à la tradition de l'empirisme logique et que nous avons analysés plus haut, c'est-à-dire le problème de fonder le système des mathématiques classiques sur un langage finitiste et le problème de l'extension de la méthode axiomatique aux sciences empiriques, et notamment aux sciences physiques. Plus précisément, l'analogie éloignée entre les mathématiques et la physique qu'esquisse Carnap (1958) dans son article sur le langage d'observation et le langage théorique implique deux solutions, pour ainsi dire, « croisées » à de tels problèmes, qui consistent à effectuer, respectivement, une opération de « physicalisation des mathématiques » et une opération de « mathématisation de la physique ».

²²² « Nous nommons *propriété ou concept de propriété* [*'Eigenschaft' oder 'Eigenschaftsbegriff'*] une fonction propositionnelle à un seul argument [*'eine Aussagesfunktion mit nur einer Argumentstelle'*]. Les objets qui satisfont cette fonction [c'est-à-dire qui la rendent vraie] [*Die diese Funktion befriedigenden Gegenstände'*] possèdent cette propriété ou tombent sous [*'fallen unter'*] son concept. Nous nommons *relation ou concept de relation* [*'Beziehung' oder 'Beziehungsbegriff'*] une fonction propositionnelle à deux ou plusieurs places d'argument (relation dy- ou polyadique) [*'Aussagesfunktion mit zwei oder mehr Argumentstellen'*]. Pour les paires, triplets, etc. qui satisfont cette fonction, nous disons que la relation est valable pour eux ou qu'elle existe entre eux [*'gilt für sie oder 'besteht in ihnen'*] ou qu'ils sont dans cette relation [*die Gegenstände 'stehen in der Beziehung' zu einander'*]. Toute fonction propositionnelle représente [*'stellt...dar'*] ainsi un concept, soit une propriété soit une relation...De la proposition 'Berlin est une ville d'Allemagne', on obtient en supprimant les deux noms d'objet 'Berlin' et 'Allemagne', la fonction propositionnelle à deux places d'argument '...est une ville de...' ou 'x...est une ville de...y' ; elle représente la relation dyadique entre une ville et le pays dans lequel elle se trouve...Par conséquent, Munich est dans cette relation avec l'Allemagne mais non avec l'Angleterre, tandis que pour la paire Lune, Allemagne, on ne peut affirmer ni l'existence ni la non-existence de cette relation [*'weder das Bestehen noch das Nichtbestehen jener Beziehung'*] » (Carnap 1928 ; 2019, p. 93).

D'une part, l'analogie éloignée entre les mathématiques et la physique dont parlait Carnap (1958) suggère, en effet, qu'il serait possible de résoudre les problèmes que soulèvent les tentatives d'élucider la manière dont on pourrait fonder le système des mathématiques classiques sur un langage formel finitiste par analogie avec les rapports que l'on peut établir entre le corps conceptuel d'une théorie physique donnée, une fois qu'on l'a reconstruit sous la forme d'un système axiomatique, et le langage d'observation dont on peut se servir pour formuler les énoncés empiriques que cette même théorie est censée systématiser, à la fois déductivement et inductivement. Autrement dit, une telle analogie suggère une vision de la nature des fondements des mathématiques que l'on pourrait rapprocher de la conception « hypothético-inductiviste » dont parle Mancosu (2001, 2008). Néanmoins, cette approche des questions liées à la fondation des mathématiques comporte également une prise de recul critique par rapport à la quête de certitude que partageaient à la fois les logicistes, les formalistes et les intuitionnistes, dans la mesure où elle invite les mathématiciens à accepter, justement, l'inévitabilité de l'incertitude et donc, au fond, le fait que les différents cadres linguistiques dont on peut se servir pour reconstruire le système des mathématiques classiques se distinguent les uns des autres pour des raisons qui ne sont pas de nature cognitive ou métaphysique, mais essentiellement pragmatique. D'un tel point de vue, il ne s'agirait, en conséquence, pas de choisir le cadre qui nous garantirait la certitude absolue du raisonnement mathématique, mais le cadre qui pourrait s'avérer le plus efficace afin d'atteindre tel ou tel but pragmatique. Encore une fois, c'est précisément dans un tel sens que nous pouvons en conclure que Carnap (1939, 1958) aurait dissous, de manière dialectique, l'opposition entre ces trois tendances majeures dans la philosophie des mathématiques, en finissant par intégrer le programme hilbertien d'axiomatisation des sciences formelles (et possiblement des sciences naturelles mathématisées) à une conception générale du savoir scientifique comme construction de cadres linguistiques. D'autre part, l'analogie qu'établissait Carnap (1958) comporte également une conception de l'axiomatisation des sciences physiques comme mathématisation de ces dernières, sur la base de l'analogie entre théories mathématiques et théories physiques qu'avait dressée Hilbert (1928) lui-même lorsqu'il avait remarqué, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, que l'on peut toujours considérer « la construction d'un système de la physique théorique » (« *der Aufbau eines Systems der theoretischen Physik* ») et « la construction formaliste des mathématiques » (« *der formalistische Aufbau der Mathematik* ») comme consistant, dans les deux cas, à construire « des calculs non interprétés » (« *ungedeutete Kalküle* ») (Carnap 1958, p. 241). Plus précisément, nous pouvons en conclure qu'une telle mathématisation de la physique consisterait en ceci qu'il faudrait concevoir la reconstruction formelle, c'est-à-dire, justement, l'axiomatisation et la formalisation *stricto sensu*, des théories qui relèvent, plus généralement, des sciences empiriques comme étant fondée sur l'usage d'un langage théorique, L_T ,

qui se composerait, à son tour, d'un volet mathématique tel que celui que l'on peut définir à partir des présupposés syntaxiques $CI-C3$ et des présupposés sémantiques $CSI-CS3$ dont nous venons de parler, ainsi que d'un volet proprement théorique, si bien qu'on pourrait considérer le premier comme constituant la base du second. Autrement dit, toujours d'après Carnap (1956a, 1958), il faudrait en conclure que la différence fondamentale entre le calcul mathématique et le calcul physique, ou le système de la physique, se réduirait à « la différence fondamentale qui existe entre les signes primitifs mathématiques et les termes théoriques de la physique » (« *der grundlegende Unterschied zwischen den mathematischen Grundzeichen und den physikalischen T-Termen* »), c'est-à-dire au fait que les uns sont « des constantes logiques » (« *logische Konstanten* »), alors que les autres sont des « constantes descriptives » (« *deskriptive Konstanten* ») (Carnap 1958, p. 241). Cela dit, en quoi consisterait ce volet proprement théorique de L_T et en quoi pourrait-on le construire sur la base d'un langage mathématique tel que celui que nous venons d'analyser ? La réponse que Carnap (1956a, 1958) a lui-même apportée à une telle question s'articule, comme nous le verrons, en deux parties distinctes.

Premièrement, Carnap (1956a, 1958) affirmait que, afin de construire le volet proprement théorique du langage L_T à partir de sa base mathématique, il est nécessaire d'y introduire (« *hinzufügen* »), justement, des « termes théoriques descriptifs », ou « *termes-T descriptifs* » (« *deskriptive T-Terme* »), c'est-à-dire des termes qui ne sont pas de nature logico-mathématique et dont on peut se servir pour représenter les concepts primitifs et les concepts définis (ou déduits) de la théorie empirique que l'on est en train de reconstruire (Carnap 1958, p. 240). Si l'on suit l'approche hilbertienne que nous avons décrite dans les chapitres précédents, comme le faisait, justement, Carnap (1956a, 1958) faire cela signifie utiliser la base mathématique du langage L_T pour construire un système d'axiomes, ou postulats, qui sont à priori dépourvus de toute interprétation logique ou empirique et qui servent de définitions implicites pour ces mêmes termes. Mais en quoi pourraient consister de tels postulats ? Dans les deux articles qui nous sommes en train d'analyser ici, Carnap (1956a, 1958) précise qu'il est nécessaire de formuler deux classes de postulats, qui se distinguent à la fois par leur caractère logique et par leur caractère méthodologique. Comme nous l'avons remarqué plus haut, il s'agit, d'une part, de ce que Carnap (1956a, 1958) appelait les « *postulats théoriques* » (« *theoretische Postulate* », « *theoretical postulates* »), ou « *postulats-T* » (« *T-Postulate* », « *postulates T* »), qui ne sont rien d'autre que des énoncés qui ne contiennent aucun terme d'observation, ou « *terme-O* » (« *B-Term* »), de la théorie en question, c'est-à-dire aucun terme qui relève de V_O , « mais uniquement des termes-T » (« *sondern nur T-Terme enthalten* »), c'est-à-dire uniquement des termes qui relèvent de V_T (Carnap 1958, p. 241). Les postulats de cette première catégorie servent, par conséquent, à « représenter les lois fondamentales de la physique et aucun autre

énoncé physique, aussi bien confirmé qu'il puisse être » (« *representing the fundamental laws of physics, not other physical statements, however well established* ») (Carnap 1956a, p. 48). Toujours comme nous l'avons anticipé au début de cette section, il s'agit aussi, d'autre part, de ce que Carnap (1956a, 1958) appelait les « *postulats (règles) de correspondance* » (« *Korrespondenzpostulate* », « *correspondence postulates (rules)* »), ou « *postulats (règles)-C* » (« *C-Postulate* », « *postulates (rules) C* »), qui sont, en revanche, des énoncés qui « contiennent aussi bien des termes-O que des termes-T » (« *sowohl B-Terme wie T-Terme enthalten* ») (Carnap 1958, p. 241). C'est justement pour une telle raison que, d'un point de vue méthodologique ou épistémologique, les postulats de cette seconde catégorie se distinguent des autres en ceci que leur fonction consiste « à mettre certains énoncés de L_T qui sont d'un type bien spécifique, et seulement eux, en lien avec des énoncés de L_O » (« *effect a connection only between certain sentences of a very special kind in L_T and sentences in L_O* ») (Carnap 1956a, p. 48), ce qui permet d'assigner une interprétation empirique au postulats T, et donc, plus généralement, au langage L_T , ainsi que d'attribuer une signification, elle aussi empirique, aux termes-T de V_T en fonction des termes-O de V_O . Plus précisément, les postulats-C permettent d'effectuer soit des inférences déductives qui vont des postulats-T vers les énoncés d'observation de L_O , soit des inférences inductives qui vont de ceux-ci vers ceux-là. Dans le premier cas, ils ont la forme de « postulats universels » (« *universal postulates* »), alors que, dans l'autre, ils ont la forme de « lois statistiques qui comportent le concept de probabilité statistique (qui signifie, approximativement, fréquence relative à long terme) » (« *statistical laws involving the concept of statistical probability (which means, roughly, relative frequency in the long run)* ») (Carnap 1956a, p. 49), et donc non pas le concept de probabilité logique ou de degré de confirmation, comme c'est le cas pour les énoncés de réduction dont parle Carnap (1936b, 1937) lui-même dans *Testabilité et signification*. En conséquence, la fonction des postulats-C ne consiste pas seulement à fournir une interprétation empirique aux énoncés dont se constitue le corps conceptuel de la théorie en question, mais également à faire en sorte que cette dernière puisse remplir la double tâche de systématisation inductive et déductive des observations empiriques dont parlait Hempel (1958, 1965). Néanmoins, l'interprétation empirique que les règles de correspondance confèrent aux postulats-T, et donc au langage L_T , ainsi que la signification empirique qu'ils assignent aux termes-T de V_T ne peuvent qu'être partielles, et cela en raison de la dualité épistémologique des concepts théoriques dont nous avons parlé au début de ce chapitre. Il en découle qu'il est impossible de formuler un postulat-C pour chacun des termes de V_T , si bien que l'interprétation de ce dernier s'opère de la manière suivante : « certains d'entre eux sont mis en lien avec des termes d'observation par le biais des règles-C, et tous les autres termes de V_T sont mis en lien avec ces derniers par l'intermédiaire des postulats de T » (« *some of them are connected by the rules C with observational terms, and the remaining terms of*

V_T are connected with the first ones by the postulates of T ») (Carnap 1956, p. 47)²²³, où T n'est, encore une fois, rien d'autres que la conjonction de tous les postulats-T dont on peut se servir pour reconstruire la théorie en question, alors que C est la conjonction des postulats-C, ou des règles-C, correspondants. Cela dit, est-ce que le simple fait d'introduire des termes théoriques qui ne sont que partiellement réductibles à des termes observationnels (par le biais de postulats-T et de postulats-C) nous oblige à faire des hypothèses ontologiques quant à la nature des objets abstraits qu'ils semblent désigner ?

C'est précisément afin de répondre à cette autre question que, deuxièmement, Carnap (1956a, 1958) affirmait aussi que les termes théoriques, ou abstraits, de la physique – c'est-à-dire tous les termes qui désignent des objets « que nous ne pouvons jamais observer de manière directe » (« *die wir niemals unmittelbar beobachten können* »), tels que, par exemple, les mots « forces » (« *Kräfte* »), « champs » (« *Felder* ») et « particules » (« *Partikeln* ») (Carnap 1958, p. 242) – s'obtiennent par la construction de « schémas conceptuels généraux » (« *allgemeine Begriffsschemata* ») (Carnap 1958, p. 242). Plus précisément, de tels schémas ne sont rien d'autre que des variables et des fonctions propositionnelles, d'ordre supérieur au premier, qui sont, pour emprunter une autre expression de Carnap (1947), « *L-indéterminés* », en ceci que leur extension ne peut être déterminée par le biais des seules règles « L-sémantiques » du langage formel L_T . C'est en cela que consiste, par conséquent, leur caractère schématique²²⁴. Plus précisément, nous pouvons interpréter la manière dont Carnap

²²³ « Comme nous l'avons suggéré plus haut, il est toutefois possible d'attribuer un sens aux énoncés du calcul mathématique, quoiqu'il ne soit pas possible de le définir de manière complètement claire [*'den Sätzen des mathematischen Kalküls einen wenn auch nicht mit voller Klarheit festgelegten Sinn beizulegen'*]. Et les termes et les énoncés du système de la physique [*'des physikalischen Systems'*] reçoivent une *interprétation* [*'eine Deutung'*] par l'intermédiaire de la connexion que l'on peut établir entre ces derniers et les termes-O au moyen des postulats-C. Tout comme celle des énoncés du calcul mathématique, une telle interprétation n'est jamais achevée, car il est toujours possible de l'améliorer en introduisant d'ultérieurs postulats-C ou d'ultérieurs postulats-T [*'die gleichfalls niemals vollständig ist, da es immer möglich ist, durch Hinzufügung weiterer C- oder T-Postulate die Deutung zu verstärken.'*] » (Carnap 1958, p. 241).

²²⁴ Comme le précise Stathis Psillos (1999), cela signifie que Carnap (1956a, 1958) envisageait la référence des termes théoriques comme étant de nature purement extensionnelle, et non pas intensionnelle : bien qu'ils ne désignent pas directement des entités physiquement existantes, leur signification n'est pas non plus entièrement déterminée par de seules règles logico-formelles. La raison en est que le but de Carnap (1956, 1958a) consistait, encore une fois, à définir des « cadres linguistiques » (Carnap 1950b) qui puissent être sémantiquement étendus, en y introduisant des termes qui dénotent de nouvelles entités théoriques. D'après ce que nous avons appelé le « principe de tolérance sémantique », y introduire des termes d'une telle nature signifie, néanmoins, y introduire des prédicats d'ordre supérieur au premier, ainsi que les variables qui constituent les parcours de signification de ces derniers, c'est-à-dire, justement, y introduire de nouveaux « schémas conceptuels généraux » (Carnap 1958). Pour ce faire, il faut, au préalable, que le cadre linguistique

(1956a, 1958) envisageait l'extension des termes théoriques comme étant le résultat d'une construction qui doit s'opérer à partir des termes-O et par l'intermédiaire des « objets mathématiques dont se constitue le système logique d'ordre supérieur au premier que nous avons décrit plus haut » (« *die mathematischen Gegenstände des oben beschriebenen Stufensystems* »), tels que les « nombres naturels » (« *natürliche Zahlen* »), les « classes de nombres naturels » (« *Klassen von solchen* »), etc. (Carnap 1958, p. 242), c'est-à-dire, encore une fois, par l'intermédiaire de la base mathématique du langage L_T lui-même. Concrètement, cela signifie que nous pouvons supposer, comme le remarque Carnap (1956a) dans son article datant de 1956, que le langage

L_T repose sur un certain système de coordonnées spatio-temporelles [*'a particular space-time coordinate system'*] ; les points du *continuum* spatio-temporel [*'the space-time points'*] ne sont alors rien d'autre que des quadruples ordonnés de nombres réels [*'ordered quadruples of real numbers'*] et appartiennent, en conséquence, à D , d'après C2. Une région du *continuum* spatio-temporel est une classe de points spatio-temporels [*'A space-time region is a class of space-time points'*] » (Carnap 1956a, p. 43-44).

À partir de cela, nous pouvons donc caractériser tous les objets, tous les systèmes et tous les processus physiques qui se déroulent dans le *continuum* spatio-temporel et qui font l'objet des énoncés qui contiennent des termes de L_T comme s'il s'agissait de classes de grandeurs physiques (« *physical magnitudes* ») qui ne sont pas directement observables, telles que la « densité de charge », ou « densité électronique », (« *Ladungsdichte* ») et la « masse volumique » (« *Massendichte* ») (Carnap 1958, p. 243)²²⁵. Ces grandeurs non observables ne sont, à leur tour, rien d'autre que des fonctions

en question possède les « moyens » nécessaires pour formuler ces nouveaux termes, c'est-à-dire qu'il soit doté de fonctions mathématiques qui soient « extensionnellement identiques » (« *extensionally identical* ») aux termes que l'on souhaite introduire, et donc qui appartiennent aux mêmes types logiques que ces derniers. Si une telle condition est remplie, « peu importe quelles soient les caractéristiques de la nouvelle grandeur physique, son type logique sera identique à une certaine fonction mathématique, que l'on peut exprimer dans le langage extensionnel L_T » (« *No matter what the features of a new physical magnitude may be, its logical type will be identical with a certain mathematical function, which can be expressed in the extensional language L_T* ») (Psillos 1999, p. 55). Il en découle qu'envisager la référence des termes théoriques comme étant entièrement déterminée par les règles sémantiques qui sont propres à ce même langage, c'est-à-dire comme étant de nature intensionnelle, signifierait restreindre de manière « *a priori* » la classe des fonctions mathématiques dont on pourrait se servir pour exprimer tel ou tel terme, et donc limiter, toujours de manière « *a priori* », la latitude d'extension du langage L_T .

²²⁵ La masse volumique d'un corps physique n'est rien d'autre que la masse de ce même corps par unité de volume (« *mass per unit volume* ») (Griffiths 1999, p. 46), alors que le terme « densité de charge » sert à décrire la distribution d'une charge continue dans l'espace. Plus précisément, si la charge continue en question est « distribuée sur une ligne droite »

$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, c'est-à-dire des fonctions qui associent un certain m -uplet ordonné de nombres réels, représentant les possibles valeurs des grandeurs en question, à un autre n -uplet de nombres réels, représentant une région où un point du *continuum* spatio-temporel. Autrement dit, il s'agit d'identifier des classes de couples ordonnés de m -uplets et de n -uplets qui permettent de définir des grandeurs physiques comme étant des propriétés mesurables de points ou de régions du *continuum* spatio-temporel en tant que système de coordonnées qui relève de la géométrie analytique. Par conséquent, c'est précisément en procédant d'une telle manière que nous pouvons construire, par exemple, le terme théorique « électron » (« *Elektron* »), en tant que schéma conceptuel, au moyen de signes logico-mathématiques, en formulant un postulat-T qui affirme qu'« un électron, au sens classique du terme, se définit par une certaine distribution [spatio-temporelle] locale de la densité de charge électrique et de la masse volumique » (« *Ein Elektron im klassischen Sinn ist...durch eine bestimmte lokale Verteilung der elektrischen Ladungsdichte und der Massendichte charakterisiert* ») (Carnap 1958, p. 243). Plus précisément, nous pouvons construire les termes théoriques (ou abstraits) de la physique, comme le terme « électron », en tant que termes qui

désignent des objets mathématiques [*'bezeichnen mathematische Gegenstände'*], par exemple des nombres, ou des fonctions de nombres, ou des fonctions de fonctions, qui sont, néanmoins, caractérisés de manière physique [*'die aber physikalisch charakterisiert sind'*], c'est-à-dire qui sont définis de manière à ce qu'ils entretiennent les relations avec les processus observables qui sont déterminées par les postulats-C [*'sie die in den C-Postulaten festgesetzten Beziehungen zu beobachtbaren Vorgängen haben'*] et de manière à ce qu'ils satisfassent, en outre, les conditions qu'expriment les postulats-T [*'die in den T-Postulaten angegebenen Bedingungen erfüllen'*] (Carnap 1958, p. 243).

Cela dit, comment serait-il possible de relier les grandeurs physiques, pour ainsi dire, « abstraites » – c'est-à-dire les grandeurs que l'on peut construire, d'un point de vue mathématique, en tant que propriétés du *continuum* spatio-temporel – aux propriétés directement observables et mesurables (ou du moins plus facilement observables et mesurables) des corps physiques qui font l'objet des énoncés

(« *spread out along a line* »), alors on parle de « densité linéique de charge », qui n'est rien d'autre que la « charge par unité de longueur » (« *charge-per-unit-length* ») « λ », si elle est « étalée sur une surface » (« *smearred out over a surface* »), alors on parle de « densité surfacique de charge », c'est-à-dire de la « charge par unité de surface » (« *charge-per-unit-area* ») « σ », tandis que, si elle « remplit un volume d'espace » (« *fills a volume* »), alors on parle de « densité volumique de charge », c'est-à-dire de la « charge par unité de volume » (« *charge-per-unit-volume* ») « ρ » (Griffiths 1999, p. 62).

d'observation (c'est-à-dire des énoncés que l'on peut formuler en n'utilisant que des termes qui relèvent du langage L_0) ?

Afin de répondre à une telle question, nous pouvons considérer un langage d'observation qui contient un nombre fini de constantes descriptives primitives qui désignent des corps observables (en conformité avec l'exigence de finitisme et avec l'exigence d'observabilité dont nous avons parlé plus haut), et plus précisément qui attribuent à chacun des corps en question un nombre naturel correspondant, par exemple, à « l'emplacement observable u » (« *observational location u* ») (Carnap 1956a, p. 47) qu'il occupe dans le cadre du dispositif de mesure que l'on est en train d'utiliser²²⁶. En nous servant exclusivement de l'appareil logico-mathématique de ce même langage, nous pouvons donc définir des variables qui représentent les possibles valeurs de grandeurs physiques qui sont (du moins relativement) facilement mesurables – comme, par exemple, la masse ou la température macroscopique de tel ou tel corps – en tant que fonctions de la forme $\varphi: N \subset \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$, qui associent à chaque nombre désignant tel ou tel corps physique le nombre réel correspondant à la valeur mesurée de la propriété en question, si bien qu'un énoncé tel que « la masse du corps à l'emplacement numéro 5 est de m Kg et celle du corps à l'emplacement numéro 6 est de $m + 1$ Kg » se traduit par une formule de la forme « $(\varphi_M(5) = m) \wedge (\varphi_M(6) = m + 1)$ » (ce

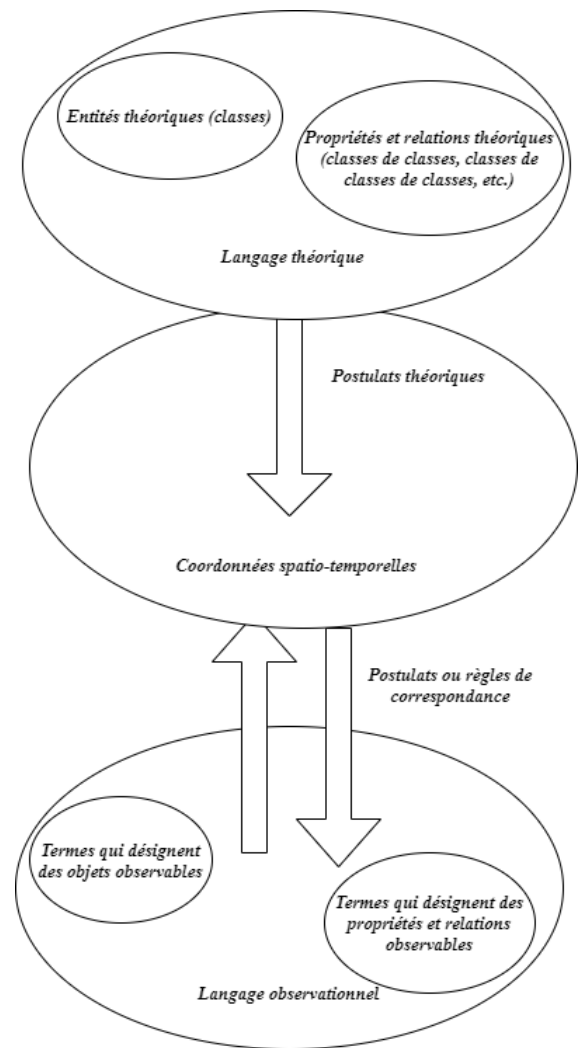


Figure 4 : Diagramme qui représente la structure logico-syntaxique du langage formel L , telle que l'envisageait Carnap (1956a, 1958).

²²⁶ Comme l'observait Carnap (1958) lui-même, bien que, dans les faits, des constantes ainsi définies finissent toujours par désigner des objets mathématiques, elles restent, tout de même, des constantes descriptives du langage de la physique. Pour s'en rendre compte, il suffit de considérer le cas, plus simple à analyser, de la constante « n_p », que l'on peut définir, d'un point de vue métalinguistique, au moyen de l'expression verbale « le nombre des planètes » (« *die Anzahl der Planeten* ») (Carnap 1958, p. 243). Cette constante désigne un nombre naturel, 9, qui appartient, par conséquent, au domaine D^0 , mais elle demeure, quand même, une constante descriptive (du langage de la physique), dans la mesure où l'énoncé qu'il faut utiliser pour la définir d'une telle manière, et donc pour exprimer l'identité entre « n_p » et le nombre 9, est de la forme « $n_p = 9$ ». Cet énoncé est, en effet, un énoncé « synthétique » (« *synthetisch* ») (Carnap 1958, p. 243), car le nombre 9 ne constitue pas une composante essentielle de la signification du terme « le nombre des planètes », qui aurait tout aussi bien pu être 7 ou 8, n'eût-ce été pour des raisons entièrement contingentes, qui tiennent à l'histoire de l'Univers et aux développements alternatifs qu'elle aurait pu connaître.

qui est en conformité avec les exigences de définissabilité, de nominalisme et de constructivisme que nous avons définies plus haut). Afin de mettre en relation des énoncés de cette forme avec des énoncés de L_T qui portent sur des propriétés du *continuum* spatio-temporel, il suffit, par conséquent, de « préciser une méthode qui permette d'identifier les coordonnées [spatio-temporelles] de tout emplacement que l'on peut déterminer de manière observable » (« *specify a method for finding the coordinates of any observationally specified location* »), c'est-à-dire d'identifier « une relation R que tel ou tel emplacement observable u entretient avec les coordonnées x, y, z, t , où x, y, z sont les coordonnées spatiales et t est la coordonnée temporelle de l'emplacement en question » (« *a relation R which holds between any observable location u and the coordinates x, y, z, t , where x, y, z are the spatial coordinates and t is the time coordinate of u* ») (Carnap 1956a, p. 47). Les énoncés qui expriment des relations de ce type, et qui relient, par conséquent, les valeurs des grandeurs mesurables qui sont associées à tel ou tel emplacement u à celles des grandeurs abstraites que l'on peut définir comme étant des propriétés de points ou de régions du *continuum* spatio-temporel, ne sont rien d'autre que les règles de correspondance, ou postulats-C. Il en découle que, tout comme dans le cas des nombres et, plus généralement, des objets mathématiques dont se constitue l'ontologie de la base mathématique du langage L_T , nous pouvons construire, au sein du domaine D de ce même langage, des chaînes, ou des suites, hiérarchiquement organisées d'entités physiques qui relèvent de types logiques de complexité croissante, en nous servant des points du *continuum* spatio-temporel comme entités de base. C'est pourquoi Carnap (1956a) en concluait que

sur la base de nos conventions [*'on the basis of our conventions'*], le domaine D contient des points et des régions spatio-temporels, des grandeurs physiques et leurs valeurs, des systèmes physiques et leurs états [*'contains space-time points and regions, physical magnitudes and their values, physical systems and their states'*]...De manière analogue, l'on peut montrer que toutes les autres entités qui figurent dans les théories physiques [*'all other entities occurring in physical theories'*] appartiennent à D (Carnap 1956a, p. 44).

De telles entités sont, par conséquent, des constructions logiques, ou syntaxiques (Nagel 1950 ; Psillos 1999), que l'on peut établir, en même temps que les termes qui les désignent, sur la base des signes descriptifs de L_O qui représentent des corps, des propriétés ou des relations physiquement observables, ainsi qu'au moyen de signes logico-mathématiques. Il en découle que nous pouvons dresser un parallèle entre *La Construction logique du monde* et les réflexions de Carnap (1956a, 1958) sur la structure du langage formel L . D'une part, Carnap (1928) avait tâché, en effet, de reconstruire le système entier des objets et des concepts physiques à partir des vécus élémentaires du sujet. Pour

ce faire, il s'était donc servi du système logique des *Principia Mathematica*. D'autre part, il a essayé de reconstruire formellement le système de lois qui caractérise telle ou telle théorie (notamment telle ou telle théorie physique) à partir d'énoncés d'observation et en se servant d'un système logique ayant la forme d'une théorie (simple) des types – c'est-à-dire d'un système qui ressemblait, encore une fois, à celui des *Principia Mathematica* – tout en remplaçant ce dernier dans le contexte de la conception de la reconstruction formelle du savoir comme construction de cadres linguistiques qu'il avait développée dans l'entretemps, comme nous l'avons observé dans les chapitres précédents. Cela dit, en quoi un tel échafaudage logique se prêterait-il à fournir un critère de signification, et notamment de signification empirique, pour les termes abstraits qu'il permet de construire ?

Afin de répondre à une telle question, il est nécessaire de comprendre ce qu'entendait Carnap (1956a) par « signification empirique » (« *empirical significance* », « *empirical meaningfulness* »). Dans un « sens présystématique » (« *presystematic sense* »), écrivait ce dernier, l'on peut affirmer qu'un certain terme, « M », qui relève de V_T possède une signification empirique s'il existe un énoncé théorique qui le contient et qui permet d'en déduire une prédiction, au sujet d'un « événement observable » (« *observable event* ») donné (Carnap 1956a, p. 49), qu'il ne serait pas possible de formuler si « M » était absent de ce même énoncé ou s'il avait été remplacé par un autre terme. En termes plus formels, cela signifie que, premièrement, il doit exister un énoncé théorique « S_M » qui ne contienne aucun autre terme théorique que « M » et qui permette d'en inférer – soit déductivement, soit inductivement – un certain énoncé « S_O » de L_O qui porte sur l'événement observable en question, éventuellement à l'aide des postulats T , des règles de correspondance C et d'une classe d'énoncés théoriques « S_K » qui contiennent d'autres termes de V_T que « M » (Carnap 1956, p. 49-50). Cela implique, deuxièmement, qu'il faut que l'on puisse déduire « S_O » de la conjonction des quatre prémisses « S_M », « S_K », T et C , mais non pas de la conjonction des (classes d') énoncés « S_K », T et C , sans « S_M ». En conséquence, c'est seulement lorsque ces deux conditions sont satisfaites que l'on peut affirmer que le terme « M » et l'énoncé théorique qui le contient, « S_M », possèdent une signification empirique, quoique non pas dans l'absolu, mais seulement en relation à « S_K », à T , à C , ainsi qu'au langage d'observation L_O , en ceci que c'est par l'intermédiaire de ce dernier qu'il est possible d'exprimer, justement, les conséquences empiriques du terme « M » et de l'énoncé « S_M ». Ces considérations nous permettent, par conséquent, de remarquer, encore une fois, que Carnap (1956a, 1958) envisageait le concept de signification, et notamment de signification empirique, d'un terme théorique, « M », donné d'un point de vue qui était en premier lieu méthodologique, ou épistémologique, et seulement en second lieu strictement logique. Elles nous permettent, en outre, de tirer deux conclusions au sujet de ce même concept qui sont particulièrement importantes pour comprendre la définition formelle qu'en donnait Carnap (1956a). Premièrement, nous pouvons en

conclure que, comme la signification empirique d'un terme tel que « M » peut dépendre de la signification empirique d'autres termes théoriques – c'est-à-dire de ceux qui sont contenus dans les énoncés qui appartiennent à la classe « S_K » – il faut évaluer la signification de tous les termes de V_T « de manière séquentielle » (« *in a serial order* »), en partant de ceux qui sont directement liés à des termes de V_O par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs règles de correspondance, si bien que leur signification empirique ne dépend pas de celle d'autres termes théoriques. Il en découle que

V_T peut être considéré comme étant doué d'une signification empirique [*'can be regarded as significant'*], dans son intégralité, seulement si nous pouvons montrer, pour une séquence donnée de ses termes [*'show for a certain sequence of its terms'*], que chacun d'entre eux possède une signification empirique relativement à la classe des termes qui le précèdent dans cette même séquence [*'relative to the class of the terms preceding it in the sequence'*] (Carnap 1956a, p. 50-51).

Deuxièmement, nous pouvons également en conclure que la signification de chaque terme théorique « M » dépend du fait que ce dernier est situé dans un contexte théorique qui est défini par la conjonction de postulats théorique T que l'on peut utiliser pour représenter les lois scientifiques fondamentales qui structurent la théorie à laquelle appartient le terme en question. Cela ne signifie, cependant, pas que la signification empirique de « M » change nécessairement chaque fois que de nouveaux faits scientifiques sont découverts, car le système des postulats- T ne contient que des énoncés universels représentant, justement, des lois fondamentales, et donc aucun énoncé théorique isolé. Il s'ensuit que, comme le précisait Carnap (1956a) lui-même, « la classe des termes de L_T que l'on accepte comme étant doué d'une signification empirique [*'admitted as significant'*] » « ne changera, généralement, que lorsque se produit une révolution radicale dans le système de la science [*'a radical revolution in the system of science'*], notamment par l'introduction d'un nouveau terme théorique primitif [*'a new primitive theoretical term'*] et par l'ajout de postulats qui définissent implicitement ce même terme » (Carnap 1956a, p. 51).

En conséquence, c'est précisément à partir de ces deux conclusions que Carnap (1956a) définit, toujours dans son article datant de 1956, le « concept auxiliaire » (« *auxiliary concept* ») de « signification empirique relative » (« *relative significance* ») d'un terme théorique « M » par rapport à une classe de termes théoriques K , ainsi que « le concept même de signification empirique » (« *the concept of significance itself* ») (Carnap 1956, p. 51). Plus précisément, Carnap (1956a) définissait le concept de « signification relative » de la manière suivante :

DI. Un terme ' M ' est doué d'une signification empirique relativement à la classe de termes K [*significant relative to the class K of terms*], par rapport à L_T , L_O , T et $C \stackrel{\text{def}}{=} \text{les termes de } K \text{ appartiennent à } V_T$, ' M ' appartient à V_T mais non pas à K et il existe trois énoncés, S_M et S_k dans L_T et S_O dans L_O , qui remplissent les conditions suivantes :

- a) S_M ne contient aucun autre terme descriptif que ' M '.
- b) Les termes descriptifs qui sont contenus dans S_k appartiennent à K .
- c) La conjonction [$S_M \wedge S_k \wedge T \wedge C$] est consistante [*consistent*] (c'est-à-dire qu'elle n'est pas logiquement fautive) [*not logically false*].
- d) S_O est logiquement impliqué [*logically implied*] par la conjonction [$S_M \wedge S_k \wedge T \wedge C$].
- e) S_O n'est pas logiquement impliqué par [$S_k \wedge T \wedge C$]

(Carnap 1956a, p. 51). En ce qui concerne le concept même de signification empirique, la définition qu'en donnait Carnap (1956a) est la suivante :

D2. Un terme ' M_n ' est doué d'une signification empirique [*significant*], par rapport à L_T , L_O , T et $C \stackrel{\text{def}}{=} \text{il existe une séquence de termes } 'M_1', \dots, 'M_n' \text{ de } V_T \text{ telle que chaque terme } 'M_i' (i = 1, \dots, n) \text{ soit doué d'une signification empirique relativement à la classe de tous les termes qui le précèdent dans la séquence en question, par rapport à } L_T, L_O, T \text{ et } C$

(Carnap 1956a, p. 51), pourvu que, comme nous l'avons vu plus haut, le premier terme de la séquence « M_1 », ..., « M_n » soit tel que l'on puisse supposer que sa signification empirique ne dépende de celle d'aucun autre terme théorique (c'est-à-dire que l'on puisse supposer, par exemple, qu'il soit directement relié à un terme observationnel au moyen d'un ou de plusieurs postulats-C). Le cas échéant, comme le rappelait Carnap (1956a) lui-même, le terme « M_1 » peut être considéré comme étant doué d'une signification empirique en ceci qu'il remplit les conditions que pose la définition *DI*, c'est-à-dire en ceci qu'il est doué d'une signification qui est relative à une classe de termes vide (Carnap 1956a, p. 52). En conséquence, la définition même du concept de signification empirique tel que l'entendait Carnap (1956a) nous permet d'identifier un point de concordance majeur entre la conception de la reconstruction formelle et de l'interprétation empirique des théories scientifiques que prônait ce dernier et celle que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965). Plus précisément, elle nous permet d'en conclure que, tout comme Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) lui-même, Carnap (1956a) considérait que, afin d'attribuer une interprétation empirique,

quoique partielle, à un terme théorique donné il est nécessaire de définir, au préalable, un certain contexte théorique, qui se compose à la fois d'énoncés purement théoriques, d'énoncés mixtes et d'énoncés observationnels. Cela dit, quels autres points de contact serait-il possible d'établir entre l'interprétation holiste de la conception classique des théories scientifiques de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) et la conception classique telle que la concevait Carnap (1956a, 1958) ? De quelle manière ces autres points de concordance pourraient-ils nous permettre de comprendre en quoi la conception classique constituerait un véritable cadre conceptuel ?

3.2.2 Le caractère logique des postulats *TC* comme règles de traduction d'expressions du langage observationnel en expressions du langage théorique et comme schéma de pensée : une vision holiste de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel

Comme première chose, nous pouvons remarquer qu'un autre point de contact entre les vues de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) et celles de Carnap (1956a, 1958) consiste en ceci que le second considérait, tout comme le premier, que le système axiomatique au moyen desquels on peut reconstruire formellement le contenu conceptuel d'une théorie donnée et les postulats, ou plus généralement les énoncés, dont on peut se servir pour interpréter un tel système remplissent une seule et même fonction. Plus précisément, de même que Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), Carnap (1956a, 1958) estimait qu'une telle fonction serait double, puisque les postulats *TC* « ne contribuent pas seulement à déterminer la signification des termes-T, mais représentent également le contenu factuel de la théorie en question » (« *Sie tragen nicht nur zur Bedeutungsbestimmung der T-Terme bei, sondern stellen auch den faktischen Gehalt der Theorie dar* ») (Carnap 1958, p. 244). Cela n'est, en effet, rien d'autre qu'une conséquence directe du fait que ces postulats ne se limitent pas à mettre en relation des termes-T et des termes-O, mais permettent également de systématiser – c'est-à-dire de prédire, de post-dire ou d'expliquer – des généralisations ou des preuves empiriques, soit de manière déductive, soit de manière inductive. Par conséquent, c'est également en cela que les conclusions que Carnap (1956a, 1958) pouvait tirer au sujet du système de postulats *TC*, qui est censé reconstruire le contenu conceptuel et empirique de telle ou telle théorie, rejoignaient la conception holiste de l'interprétation des théories scientifiques que prônait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965). Mais est-ce que Carnap (1956a, 1958) en concluait, lui aussi, pour autant que la conjonction du système axiomatique qui représente une théorie donnée et du système interprétatif que l'on peut y associer consisterait dans un ensemble d'énoncés synthétiques qui posséderaient différents degrés de signification empirique ? Comme le remarquait Carnap (1966) lui-même, il est impossible de soulever la question de la signification cognitive des postulats *C* sans prendre simultanément en

considération la signification des postulats T , puisque les premiers ne sont rien d'autre qu'une chaîne d'énoncés qui contiennent des termes de V_T dont la signification dépend également des seconds. Il en découle que, si l'on veut considérer les postulats C comme étant des énoncés analytiques, il est nécessaire d'admettre, en même temps, que les postulats T sont analytiques, eux aussi, et inversement. En d'autres termes, lorsqu'on s'intéresse à la signification cognitive d'une théorie que l'on a reconstruite sous la forme d'un calcul logique partiellement interprété, il est nécessaire de considérer la signification de la théorie tout entière, c'est-à-dire la signification de la théorie en tant que conjonction inséparable de postulats TC , et non pas seulement celle des énoncés qui constituent l'une ou l'autre de ces deux composantes. Cela dit, est-ce qu'on pourrait regarder la conjonction de postulats TC comme étant analytique ? La réponse que Carnap (1966) apportait à une telle question était négative, puisqu'il affirmait, justement, que, en joignant les postulats C aux postulats T , « nous avons obtenu le maximum d'interprétation empirique qui peut être attribué à nos termes théoriques [*'all the empirical meaning we can get for our theoretical terms'*], mais nous avons aussi obtenu des informations factuelles [*'factual information'*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 259-260), qui consistent, comme nous venons de l'évoquer, dans la systématisation (déductive ou inductive) de tel ou tel ensemble d'énoncés observationnels. Par conséquent, c'est précisément pour de telles raisons que Carnap (1966) pouvait affirmer que « la conjonction des postulats-T et -C nous livre donc des énoncés synthétiques » (Carnap 1966 ; 1973, p. 259-260). Il semblerait, ainsi, que, malgré l'insistance de Carnap (1956a, 1958, 1966) sur l'importance de la distinction entre les composantes analytiques et les composantes synthétiques des théories scientifiques, la manière dont ce dernier envisageait la conception classique se prêterait elle-même à une interprétation holiste. Mais en quoi consisterait, plus précisément, le rôle spécifique que joueraient les postulats-C dans le cadre de cette interprétation holiste de la conception classique des théories scientifiques ?

Pour reprendre, encore une fois, les mots mêmes de Carnap (1966), ainsi que, en partie, ceux de Hempel (1958, 1965), il est possible de concevoir les postulats-C comme étant des règles qui constituent une sorte de « dictionnaire » (« *dictionary* »), comme l'appelait Norman R. Campbell (1920)²²⁷, permettant de traduire des termes et des énoncés du langage L_O en termes et en énoncés du langage L_T , ou inversement. Mais qu'est-ce que cela veut dire, d'un point de vue purement logique

²²⁷ « L'usage de ces règles est en effet comparable à celui d'un dictionnaire anglais-français puisqu'en reliant un terme à un autre, elles nous font passer d'une terminologie à une autre [*'connect a term in one terminology with a term in another terminology'*]. Que signifie le vocable anglais 'horse' ? Consultez votre dictionnaire et vous trouverez qu'il signifie 'cheval'. Bien sûr, relier des non-observables avec des observables n'est pas une opération aussi aisée. Néanmoins il y a une analogie [*'analogy'*] et Campbell [(1920)], en parlant de 'dictionnaire', évoque de façon suggestive le rôle des règles de correspondance » (Carnap 1966 ; 1973, p. 227).

et formel, que de traduire un terme, ou un énoncé, d'un langage à un autre ? Comme le rappelait Quine (1960), faire cela signifie établir une relation de « synonymie » (« *synonymy* ») entre deux assertions. Mais que signifie, donc, le terme « synonymie » dans un tel contexte ? En suivant, encore une fois, Quine (1960), l'on peut observer qu'un tel concept se définit au moyen d'une notion qui relève de la « sémantique philosophique intuitive » (« *intuitive philosophical semantics* »), qui n'est rien d'autre que la notion d'« énoncé analytique » (« *analytic sentence* »). Comme nous l'avons vu à plusieurs reprises, un énoncé analytique est, au sens large du terme, un énoncé qui est vrai « simplement en vertu de sa signification » (« *true purely by meaning* ») et non pas en fonction de tel ou tel contenu factuel, comme, par exemple, les énoncés « aucun célibataire n'est marié », « tous les porcs sont des porcs », ou encore « $2 + 2 = 4$ ». Il en découle que l'on peut définir mutuellement l'analyticité et la synonymie de la manière qui suit : « des phrases sont synonymes si et seulement si leur biconditionnelle [*biconditional*] (formée en les reliant par 'si et seulement si') est analytique ; et une phrase est analytique si et seulement si elle est synonyme d'une 'auto-conditionnelle' [*self-conditional*] (si p , alors p) » (Quine 1960 ; 1977, p. 108). C'est pourquoi nous pouvons en conclure, comme le faisait, justement, Quine (1960) lui-même, que « nous ne pouvons parler sensément de la synonymie interlinguistique qu'en termes de quelque système particulier d'hypothèses analytiques [*analytical hypotheses*] » (Quine 1960 ; 1977, p. 121), c'est-à-dire en termes de quelques tables de concordance, de nature purement conjecturale, qui permettent de mettre en relation des mots ou des bouts de phrases du langage cible et des mots ou des bouts de phrases du langage source. Il en découle que l'on peut envisager la conception classique des théories scientifiques, du moins telle que la présentait Carnap (1956a, 1958), comme étant un cadre métalinguistique et métathéorique dont la fonction consisterait, plus précisément, à définir ce que l'on pourrait qualifier d'« analogue » du système d'hypothèses analytiques dont parlait Quine (1960), dans le but d'établir des relations de synonymie interlinguistique, quoique partielles, entre des termes et des énoncés qui relèvent d'un certain langage d'observation L_O , d'une part, ainsi que des termes et des énoncés qui relèvent du langage théorique correspondant, L_T , d'autre part. De plus, si l'on suit, encore une fois, Quine (1960), il est possible de dresser un parallèle explicite entre la relativité de la traduction par rapport à un système d'hypothèses analytiques donné et la relativité des conditions de vérité de telle ou telle phrase par rapport à un certain contexte théorique, c'est-à-dire par rapport à un certain « schéma de pensée » (Quine 1960). Cela nous permet donc d'avancer l'hypothèse que ce serait précisément par l'intermédiaire d'un certain système d'hypothèses analytiques que la conception classique finirait par imposer, en tant que schéma de pensée, des contraintes ontologiques, épistémologiques et conceptuelles à la structure et au contenu des théories scientifiques. En conséquence, ce serait précisément ce système d'hypothèses analytiques qui ferait de la conception classique non seulement

un cadre métalinguistique et métathéorique, mais également un cadre conceptuel. Cela dit, en quoi consisteraient, plus concrètement, de telles hypothèses ?

Si nous envisageons les postulats-C comme une sorte de dictionnaire empirique permettant d'interpréter, quoique partiellement, un système axiomatique donné et si nous acceptons une conception holiste de la manière dont s'opère une telle interprétation, nous pouvons en conclure que ce sont de tels postulats, en conjonction avec les postulats-A, qui constituent, dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, l'équivalent des « hypothèses analytiques » dont parlait Quine (1960). Néanmoins, nous pouvons également en conclure qu'il existe de profondes différences entre ces deux catégories d'hypothèses, ou de postulats, qui sont à la fois de nature structurelle, c'est-à-dire logique, et de nature fonctionnelle, c'est-à-dire épistémologique. D'un point de vue strictement logique, comme nous venons de le voir, la conjonction des postulats **TC** nous livre des énoncés qui sont synthétiques, et non pas analytiques. D'un point de vue épistémologique, la fonction de ces mêmes postulats consiste, comme nous venons de le suggérer, non seulement à expliciter le contenu et la structure de telle ou telle théorie en traduisant les énoncés qui la constituent lorsqu'elle est formulée dans un certain langage naturel en énoncés du langage formel, de nature théorique, qu'on utilise afin d'en reconstruire le corps conceptuel, mais également à effectuer une telle traduction par l'intermédiaire des observations empiriques qui sont supposées fonder la théorie en question, et qu'il faut reformuler par le biais d'un langage d'observation qui est, lui aussi, de nature formelle. Il en découle que les postulats-T et -C, d'une part, ainsi que les hypothèses analytiques dont parlait Quine (1960), d'autre part, remplissent des fonctions de traduction dont l'analogie est purement superficielle, puisqu'elles relèvent, pour ainsi dire, de deux « catégories » profondément différentes. Cette dysanalogie fonctionnelle est donc essentielle pour comprendre la nature de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel, en ceci qu'elle nous permet de l'inscrire dans la droite ligne de l'approche de la reconstruction logique et formelle du savoir scientifique que Carnap (1928, 1961b) a continué à développer depuis la première édition de *La Construction logique du monde*. Une telle approche s'inspirait, notamment, d'une devise que ce dernier avait empruntée directement à Bertrand Russell (1926) : il faut toujours traiter « la conception entière du monde physique comme une *construction* [*'construction'*] plutôt que comme le fruit d'une *inférence* [*'inference'*] » (Russell 1926 ; 2002, p. 30). Autrement dit, d'après la conception carnapienne de la reconstruction rationnelle du savoir expliciter la structure et le contenu de telle ou telle théorie scientifique signifie non pas établir des inférences analytiques directes entre un ensemble d'énoncés formulés dans un langage naturel et un système axiomatique d'énoncés formulés dans un langage formel, mais, justement, construire de toute pièce la théorie en question à partir de ses propres fondements empiriques. En conséquence, c'est précisément parce qu'elle permet de transformer des

énoncés observationnels en des énoncés qui contiennent des termes théoriques, et inversement, que l'on peut interpréter la conception classique des théories scientifiques comme n'étant rien d'autre que l'application de l'axiomatisation et de la formalisation *stricto sensu*, en tant qu'outils de construction logico-mathématiques, à la conception carnapienne de la reconstruction du savoir. Il en découle qu'une telle conception des théories scientifiques constituerait un véritable cadre conceptuel précisément en ceci qu'elle constituerait un schéma de pensée, au sens de Quine (1960). En tant que schéma de pensée, elle nous permettrait, ainsi, non seulement de traduire les énoncés dont se constitue telle ou telle théorie dans un certain langage formel, mais également de les reconstruire (formellement) à partir de leurs propres bases empiriques, moyennant des contraintes qui affectent la substance même de la théorie en question, c'est-à-dire l'architecture des concepts qui la structurent, ainsi que son contenu empirique. Nous pouvons donc en conclure qu'une vision holiste de la conception classique des théories scientifiques pourrait nous aider à comprendre la manière dont cette dernière remplit la fonction de cadre conceptuel, en mettant en relation les corps des théories qui sont reconstruites à son instar avec leurs soubassements empiriques, tout en évitant de tracer une frontière entre composantes analytiques et composantes synthétiques. Dans une telle vision, il serait, en effet, possible de concevoir les postulats-C, ou, plus précisément, la conjonction de postulats **TC** comme étant un analogue fonctionnel du système d'hypothèses analytiques dont parlait Quine (1960), c'est-à-dire comme constituant un schéma de pensée précisément dans le sens que Quine (1960) attribuait lui-même à ce terme. En conséquence, ce serait par l'intermédiaire d'un tel schéma que la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre conceptuel, imposerait des contraintes à la structure conceptuelle et au contenu empirique de telle ou telle théorie, qui seraient, plus précisément, des contraintes de nature ontologique, épistémologique ou cognitive. Mais en quoi consisteraient donc, concrètement, ces dernières ? Et quels sont les problèmes que soulève la vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, à la fois comme cadre métathéorique et comme cadre conceptuel, que prônait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) ?

Afin d'identifier les contraintes qui sont associées à la conception classique des théories scientifiques, nous pouvons nous tourner vers la manière dont Thomas Kuhn (1970a) caractérise la conception empiriste-logiciste de la science dans une communication où il se livre à une appréciation critique de l'influence qu'avait exercée Karl Popper (1959, 1963) sur ses propres réflexions. Plus précisément, Kuhn (1970a) y affirme que, nonobstant toutes les différences qui les séparaient, Popper (1959, 1963) et lui-même ont toujours partagé un combat commun contre quelques-unes des thèses les plus caractéristiques de ce qu'il appelait le « positivisme classique » (« *classical positivism* »), c'est-à-dire l'empirisme logique. Ces thèses sont, notamment, les suivantes : premièrement, la thèse qu'il serait possible, du moins en droit, de tracer une ligne de démarcation nette entre l'observation

empirique et la théorisation en tant qu'activités scientifiques ; deuxièmement, la thèse, étroitement liée à la première, d'après laquelle l'on pourrait formuler un langage d'observation neutre, c'est-à-dire un langage qui servirait tout simplement à relater les résultats d'observations et d'expériences empiriques, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à aucun concept théorique, ce qui implique d'opérer une distinction entre les énoncés dont se compose une théorie scientifique donnée et ceux qui décrivent les observations étayant ces derniers ; troisièmement, la thèse d'après laquelle la fonction des théories scientifiques ne consisterait pas nécessairement à expliquer les phénomènes observés en termes d'objets réellement existants (Kuhn 1970a, p. 2) – comme l'ont toujours soutenu, en revanche, les partisans de différentes positions réalistes, du moins en ce qui concerne les théories scientifiques – si bien que l'on pourrait tout aussi bien les considérer comme étant « de simples outils de prédiction de phénomènes observables ou de systématisation de compte rendus d'observation » (« *merely instruments for predicting observable phenomena or systematizing observation reports* ») (Chakravartty 2017), en adoptant ainsi, comme nous l'avons remarqué plus haut, ce qu'on appelle généralement une « approche instrumentaliste » (« *instrumentalism* »). Ces trois thèses empiristes dont parlait Kuhn (1970a) représentent, par conséquent, le trait d'union entre les présupposés fondamentaux sur lesquels reposait la conception scientifique du monde du Cercle de Vienne et la conception classique des théories scientifiques en tant que « conception orthodoxe » des théories scientifiques propre à ce même courant de pensée philosophique. Autrement dit, elles représentent précisément les contraintes conceptuelles que la philosophie même du Cercle de Vienne et de la tradition de l'empirisme logique impose, en tant que « vision du monde » (« *Weltanschauung* »), à la manière dont celles et ceux qui en acceptent les principes fondamentaux se représentent la structure et le contenu des théories scientifiques. C'est pourquoi ces mêmes thèses nous permettent de mettre en lumière trois caractéristiques substantielles, et donc non pas uniquement linguistiques ou formelles, que la conception classique attribue aux théories empiriques, notamment par opposition aux théories logico-mathématiques. Mais en quoi consistent, par conséquent, de telles caractéristiques ?

La première de ces caractéristiques est, justement, de nature ontologique, dans la mesure où la thèse empiriste d'après laquelle l'observation et la théorisation constitueraient deux activités nettement distinctes comporte une certaine conception de la ligne de démarcation, justement, ontologique que l'on peut tracer entre les objets des sciences empiriques dont l'existence est prouvée par l'expérience (c'est-à-dire les « observables »), d'une part, et les objets des sciences empiriques dont l'existence semble être impliquée par l'usage d'un certain langage théorique, d'autre part. Comme en témoigne *Le Manifeste du Cercle de Vienne*, en effet, les tenants de l'empirisme logique défendaient

en outre la thèse que les énoncés du réalisme (critique) et de l'idéalisme sur la réalité ou la non-réalité du monde extérieur comme du moi des autres [*die Aussagen des (kritischen) Realismus und Idealismus über Realität oder Nichtrealität der Außenwelt und des Fremdpsychischen*], ont, eux aussi, un caractère métaphysique [*metaphysischen Charakters sind*], du fait qu'ils sont exposés aux mêmes objections que ceux de l'ancienne métaphysique [*die Aussagen der alten Metaphysik*]: ils sont dépourvus de sens, parce que non vérifiables, non factuels. *Est 'réel' ce qui peut être intégré à tout édifice de l'expérience* [*Etwas ist 'wirklich' dadurch, daß es eingeordnet wird dem Gesamtgebäude der Erfahrung*] (Carnap et al. 1929 ; Soulez 2010, p. 113).

Plus précisément, par « édifice de l'expérience », les auteurs du *Manifeste* entendaient un « système de constitution » (« *Konstitutionsystem* ») comme celui que Carnap (1928) avait tâché de bâtir dans *La Construction logique du monde*, si bien qu'un énoncé tel que « *Est 'réel' ce qui peut être intégré à tout édifice de l'expérience* » doit être compris comme signifiant que les seules entités, les seules propriétés et les seules relations que l'on peut considérer comme étant effectivement réelles sont celles qui se laissent réduire à une certaine base empirique, comme, justement, la base auto-psychique dont parlait Carnap (1928). Il s'agit, par conséquent, d'un principe qui traduit la différence entre expérience et théorisation, ou, plus généralement, entre expérience et spéculation, par une différence d'ordre ontologique, car il affirme, en opposition à toutes les traditions métaphysiques dont les empiristes logiques voulaient se démarquer, que les seules entités, les seules propriétés et les seules relations dont on peut accepter l'existence objective, sans crainte de tomber dans des sophismes ou dans des *simili*-problèmes philosophiques, sont, précisément, celles qui font l'objet de la première et non pas de la seconde, ou du moins celles qui se laissent entièrement réduire à la première, par la construction d'un système de constitution. C'est ainsi que, dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques telle que la concevait Carnap (1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) lui-même, un tel principe a fini par se traduire dans l'injonction de considérer comme réel tout ce qui peut être intégré à la structure de l'expérience telle qu'il est possible de se la représenter dans le cadre de telle ou telle théorie lorsqu'elle est reformulée sous la forme d'un calcul axiomatique partiellement interprété, c'est-à-dire toute entité, toute propriété et toute relation qui peuvent faire l'objet d'énoncés d'un sous-langage (formel) d'observation tel que L_0 . Nous pouvons considérer, en effet, que le système des énoncés que l'on peut formuler dans le sous-langage observationnel, voire dans le sous-langage observationnel étendu L'_0 , constitue, précisément, la structure de l'expérience telle qu'elle se reflète dans la structure conceptuelle qui est propre aux théories scientifiques qui sont reconstruites à l'instar de la conception classique. D'un tel point de vue, le système des énoncés que l'on peut

formuler en se servant également de termes théoriques, et notamment le système des postulats-T et des postulats-C, constitue, en revanche, ce que Stathis Psillos (1999) appelle la « superstructure théorique » (« *theoretical superstructure* ») que les scientifiques, ou les philosophes, édifient sur la base de ce même système de l'expérience et qui prend la forme, toujours dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, d'« une simple *construction syntaxique* » (« *a merely syntactic construct* ») (Psillos 1999, p. 41). Il en découle que les entités, les propriétés et les relations dont il est possible de supposer l'existence objective sont celles qui peuvent faire l'objet du système des énoncés de L_O , alors que les entités, les propriétés et les relations qui s'intègrent à la superstructure théorique que l'on peut construire au moyen de L_T doivent être considérées comme étant des constructions logiques, ou, plus précisément, comme étant des objets logico-mathématiques physiquement caractérisés.

Ainsi reformulée, la distinction entre expérience et théorisation se traduit, en conséquence, par une contrainte ontologique qu'il est nécessaire d'imposer au contenu et à la structure des théories scientifiques qui sont reconstruites dans le cadre de la conception classique. Plus précisément, cette contrainte consiste en un « double critère d'existence » (« *double existential standard* ») (Psillos 1999, p. 41), c'est-à-dire en un critère d'existence qui s'applique de manière différente aux objets observables que l'on peut décrire au moyen du langage L_O , ainsi qu'aux objets inobservables que l'on peut réduire à des *loci* spatio-temporels, d'une part, et aux systèmes d'objets inobservables qui constituent les classes d'entités sur lesquelles portent les énoncés universels de L_T , tels que, par exemple, la classe de tous les électrons ou la classe de tous les champs magnétiques, d'autre part. Comme nous venons de le voir, les premiers se distinguent des seconds justement en ceci qu'il est possible d'attribuer un sens empirique à la question de leur existence, en tant que « question interne » (« *internal question* ») (Carnap 1950b) à un cadre linguistique donné. Autrement dit, « l'existence d'entités *particulières* », comme, par exemple, tel ou tel corps observable ou « une certaine configuration d'électrons » (« *a certain configuration of electrons* »), est une « question empirique » (« *empirical issue* ») (Psillos 1999, p. 42) que l'on peut résoudre – soit directement, soit indirectement (c'est-à-dire par l'intermédiaire de règles de correspondance) – par des observations empiriques ou par des expériences, une fois que l'on a accepté un certain cadre linguistique, comme nous l'avons vu lorsque nous avons parlé du principe de tolérance sémantique. Bien au contraire, la question de « l'existence de telle ou telle classe d'entités théoriques dans sa totalité » (« *the existence of theoretical entities as a whole* ») ne saurait jamais être formulée en tant que question empirique, ni si on la considère comme « question externe » (« *external question* ») à un certain cadre linguistique donné (Carnap 1950b), ni si on la considère comme question interne à ce même cadre (Psillos 1999, p. 42). Par exemple, la question de savoir si les électrons existent constitue, en tant que question

externe – c’est-à-dire en tant que question de savoir si les électrons existent indépendamment du cadre linguistique de la théorie unifiée de l’électromagnétisme –, une *simili*-question métaphysique, et donc une question qui est complètement dépourvue de sens. En tant que question interne, la question de savoir si les électrons existent coïncide, en revanche, avec la question de savoir si la classe des électrons, en tant que classe d’objets mathématiques physiquement caractérisés, fait partie de l’univers du discours qui est associé au langage formel dont on peut se servir pour reconstruire la théorie de l’électromagnétisme. Une telle question n’est donc pas dépourvue de sens, mais elle est de nature purement analytique, puisque la classe des électrons constitue, en tant que construction logique, une composante essentielle du domaine d’objets logiques qui fait partie intégrante du cadre linguistique de l’électromagnétisme, si bien que l’énoncé « il existe des objets qui sont des électrons » s’avère être, au sein de ce même cadre, un énoncé analytique²²⁸. En conséquence, tout au moins du point de vue de la conception classique, les théories empiriques se distinguent des théories logico-mathématiques précisément en ceci que les objets dont traitent les premières sont sujets à un double critère d’existence, qui est à la fois synthétique et analytique, alors que, en ce qui concerne les objets sur lesquels portent les secondes, il n’est possible de définir qu’un seul et unique critère d’existence, qui est de nature analytique. Par exemple, la question de savoir si tel ou tel nombre naturel existe et celle de savoir si les nombres naturels existent, en tant que classe, sont, toutes les deux, soit des *simili*-questions métaphysiques, soit des questions internes au cadre linguistique de l’arithmétique élémentaire, mais de nature purement analytique. En aucun cas, il ne s’agit de questions qui admettent une réponse empirique et synthétique.

²²⁸ Comme l’observe, encore une fois, Psillos (1999), ce double critère d’existence est associé, en outre, non seulement à la distinction sémantique entre questions internes et questions externes qu’énonce Carnap (1950b) dans *Empirisme, sémantique et ontologie*, mais également à une dichotomie « métaphilosophique » qui a structuré une partie importante des réflexions des tenants du Cercle de Vienne et de la tradition de l’empirisme logique, c’est-à-dire la dichotomie entre « réalisme métaphysique » (« *metaphysical realism* ») et « réalisme empirique » (« *empirical realism* ») (Psillos 1999, p. 42). Par « réalisme métaphysique », nous entendons ici l’idée que les classes d’objets abstraits dont parlent les théories scientifiques existeraient, justement, indépendamment de tout cadre linguistique, alors que, par « réalisme empirique », nous entendons la position qu’exprimait Herbert Feigl (1943) : « Le terme ‘réel’ [‘*real*’] est utilisé dans un sens clair et, normalement, pour de bonnes raisons dans la vie de tous les jours et dans la science pour désigner tout ce qui peut être situé dans l’espace-temps [‘*that which is located in space-time*’] et qui constitue un maillon dans les chaînes de relations causales [‘*which is a link in the chains of causal relations*’]. On l’oppose, par conséquent, à ce qui est illusoire, factice et purement conceptuel [‘*purely conceptual*’]. La réalité, dans un tel sens, des pierres et des arbres, des étoiles et des atomes, des radiations et des forces, des esprits humains et des groupes sociaux, des événements historiques et des processus économiques, est susceptible d’être testée empiriquement [‘*is capable of empirical test*’] » (Feigl 1943, p. 16 ; cité par Psillos 1999, p. 43).

Par conséquent, c'est précisément en cela que consiste la contrainte ontologique fondamentale que la conception classique des théories scientifiques impose aux théories qui sont reconstruites à son instar, afin de mettre en lumière ce qui les distingue des théories logico-mathématiques, et qui est étroitement liée non seulement à la première des trois thèses empiristes dont parlait Kuhn (1970a), mais aussi à la seconde, c'est-à-dire à la thèse qu'il serait possible de formuler un langage d'observation qui soit, pour ainsi dire, « théoriquement neutre ». Une telle contrainte concerne, en effet, le statut ontologique des entités, des propriétés et des relations qui font l'objet des énoncés du langage d'observation L_O , par opposition au statut ontologique des entités, des propriétés et des relations qui font l'objet des énoncés du langage théorique L_T . Néanmoins, cette deuxième thèse empiriste est également associée à une autre des contraintes par le biais desquelles on pourrait caractériser la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel, et qui est de nature épistémologique. Comme nous l'avons suggéré plus haut, il est, en effet, possible d'établir un parallèle entre la structure bipartite du langage formel L dont la conception classique préconise l'usage afin de reconstruire telle ou telle théorie qui relève des sciences empiriques et la structure bipartite du système des sciences mathématiques tel que l'envisageaient les formalistes de l'école hilbertienne. Ce qui nous permet d'établir un tel parallèle est, plus précisément, la double opération de mathématisation de la physique et de physicalisation des mathématiques par laquelle Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a tâché de résoudre les problèmes que ces derniers avaient légués aux empiristes logiques. Mais que pouvons-nous déduire de cette « analogie éloignée », comme l'appelait Carnap (1958) lui-même, au sujet des contraintes épistémologiques que comporte la structure bipartite du langage formel L ? Afin de répondre à cette question, nous pouvons remarquer que les formalistes envisageaient les mathématiques comme consistant en deux volets : d'une part, « la mathématique proprement dite ainsi formalisée » (« *die eigentliche so formalisierte Mathematik* »), qui ne serait rien d'autre qu'un stock de formules logico-mathématiques ; d'autre part, « une métamathématique » (« *eine Metamathematik* ») de nature « contentuelle » (« *inhaltlich* ») et « finitiste » (« *finitistisch* ») (Hilbert 1931 ; Largeault 1992, p. 192), bâtie sur le modèle de l'arithmétique élémentaire, dont la fonction consisterait à déterminer les schémas d'inférence qui sont nécessaire afin de prouver la consistance des démonstrations que l'on peut effectuer dans le cadre du système dont se constitue l'autre volet. Par conséquent, les formalistes estimaient nécessaire de subdiviser le langage des mathématiques en un sous-langage entièrement formalisé, d'une part, ainsi qu'en un sous-langage finitiste et, pour ainsi dire, « logiquement observationnel », d'autre part, non seulement pour des raisons logiques, mais également pour des raisons épistémologiques. Alors que la fonction du premier sous-langage consisterait à dégager la structure formelle profonde de la pensée mathématique telle qu'elle s'exprime dans l'arithmétique élémentaire, et donc à produire une forme

de connaissance mathématique que l'on pourrait qualifier d'« abstraite », la fonction de l'autre sous-langage consisterait à assurer la cohérence et, pour ainsi dire, l'« assise empirique » – relativement à une certaine forme d'intuition sensible de nature mathématique – d'une telle connaissance abstraite. En d'autres termes, d'après la conception formaliste des mathématiques, le langage de la mathématique formalisée exercerait une sorte de contrainte épistémologique sur le langage de la métamathématique, mais serait, à son tour, épistémologiquement contraint par ce dernier. C'est ainsi que l'analogie entre la structure bipartite du langage des mathématiques et celle du langage formel L nous permet d'identifier une double contrainte épistémologique que l'on pourrait associer à la conception classique des théories scientifiques, et qui consisterait précisément en ceci que le langage L_T contraindrait épistémologiquement le langage L_O , et inversement. Mais en quoi consisterait, plus précisément, cette double contrainte et en quoi se différencierait-elle de celle que le langage métamathématique exerce sur le langage des mathématiques formalisées, et inversement ?

Dans le cas de la contrainte que le langage métamathématique exerce sur le langage des mathématiques formalisées, et inversement, il s'agit d'une contrainte qui concerne la nature des règles d'inférence qui sont admissibles dans le système des mathématiques pris dans son ensemble. Il s'agit, plus précisément, d'une contrainte qui est censée résoudre le problème de déterminer la mesure dans laquelle l'on peut faire usage de règles d'inférence transfinies si l'on veut éviter de tomber dans des paradoxes tels que, justement, les « paradoxes cantorians » (Poincaré 1906). La contrainte mutuelle que le langage L_O et le langage L_T exercent l'un sur l'autre ne concerne, en revanche, pas tout simplement des règles de déduction mathématiques ou logiques, mais, plus spécifiquement, les règles d'inférence qui permettent à telle ou telle théorie de remplir la double fonction de systématisation, inductive et déductive, des généralisations ou des preuves empiriques dont nous avons parlé plus haut. Autrement dit, il s'agit d'une contrainte qui porte sur la manière dont il est possible de se servir du langage L_O pour exprimer les conséquences empiriques des énoncés de L_T , et notamment du système de postulats TC , sous la forme de prédictions, de post-dictions ou d'explications, et que nous pourrions appeler « contrainte de symétrie inférentielle ». D'après cette contrainte, il n'existe, en effet, aucune différence essentielle entre explications, d'une part, et prédictions ou post-dictions, d'autre part, en ceci que, dans les deux cas, il s'agit d'énoncés que l'on peut déduire de la conjonction de postulats TC : faire une prédiction ou une post-diction revient ainsi à expliquer un événement futur ou présent, alors que fournir une explication équivaut à prédire un événement présent ou passé. Dans une telle perspective, il serait donc erroné de croire, d'un point de vue épistémologique, qu'il existerait des formes de connaissance qui seraient plus fondamentales que d'autres, ou, d'un point de vue ontologique, qu'il existerait des entités et des processus qui seraient plus fondamentaux que d'autres, si bien que, dans les deux cas, l'on pourrait se servir des premiers pour saisir quelques

vérités, justement, fondamentales au sujet des seconds. La véritable source de toutes les connaissances que nous pouvons espérer obtenir au sujet du monde résiderait, ainsi, exclusivement dans la connexion systématique entre phénomènes qu'effectuent les théories scientifiques et, à une échelle supérieure, le système général de la science, en l'exprimant sous la forme d'un réseau de relations inférentielles (qu'il s'agisse de relations d'implication ou de relations de confirmation) entre énoncés qui diffèrent uniquement par les places qu'ils occupent et par les fonctions qu'ils remplissent dans le cadre de tel ou tel système formalisé (ou du moins formalisable). Ce qui relie une telle contrainte à la conception classique des théories scientifiques et qui en exemplifie également la nature est, par conséquent, ce que l'on pourrait appeler la « conception orthodoxe de l'explication scientifique » propre à l'empirisme logique, c'est-à-dire le « modèle nomologico-déductif » (« *deductive-nomological model* ») de l'explication (Hempel & Oppenheim 1948 ; Hempel 1965 ; Woodward 2003 ; Kaiser 2014). D'après ce modèle, une explication scientifique n'est rien d'autre qu'un argument déductif correct dont les prémisses constituent l'*explanans*, c'est-à-dire « la classe d'énoncés convoqués pour expliquer le phénomène » (« *the class of those sentences which are adduced to account for the phenomenon* ») en question (Hempel & Oppenheim 1948 ; Kaiser 2014, p. 144), d'où l'on peut déduire, comme conclusion logique, ou inférer par raisonnement inductif une description du phénomène, ou des phénomènes, à expliquer, c'est-à-dire l'*explanandum* (Hempel & Oppenheim 1948 ; Hempel 1965). En outre, l'ensemble d'énoncés qui constitue l'*explanans* doit comporter au moins une loi générale qui « couvre » le phénomène en question – c'est-à-dire qui s'applique à toutes les occurrences de ce dernier – à côté d'énoncés qui précisent les conditions sous lesquelles cette même loi s'applique précisément au phénomène que l'on entend expliquer (Hempel & Oppenheim 1948 ; Hempel 1965 ; Woodward 2003 ; Kaiser 2014).

Il en découle que, d'après un tel modèle, le rapport entre *explanans* et *explanandum* qui fait en sorte que le premier explique le second repose sur une propriété caractéristique de la structure logique de l'explication en tant qu'argument déductif, c'est-à-dire à ce que Wesley Salmon (1989) a appelé l'« anticipabilité nomique » (« *nomic expectability* »). En d'autres termes, afin que l'on puisse affirmer qu'un certain *explanans* rend compte d'un certain *explanandum*, il faut et il suffit que l'on puisse servir du premier pour en déduire, ou pour en inférer inductivement, le second, de telle manière que la loi ou les lois que contient l'*explanans* tiennent lieu de prémisses nécessaires dans la structure de l'argument explicatif en question, c'est-à-dire de telle manière que ce dernier ne soit plus valide une fois que tout énoncé nomologique a été retiré de ses prémisses (Woodward 2003). C'est pour cette raison que la relation entre *explanans* et *explanandum* qu'implique le modèle nomologico-déductif n'admet aucune asymétrie, qu'elle soit de nature épistémique ou ontologique, entre l'explication de phénomènes présents ou passés et la prédiction de phénomènes présentes ou futurs.

Dans les deux cas, il s'agit, en effet, d'établir une relation de déduction logique entre un ensemble d'énoncés qui tiennent lieu de prémisses – dans lequel des énoncés de loi jouent un rôle essentiel – et un ensemble d'énoncés qui tiennent lieu de conclusions²²⁹. Par conséquent, le lien qui existe entre le modèle nomologico-déductif des explications scientifiques et ce que nous avons appelé la « contrainte de symétrie inférentielle » consiste précisément dans la manière dont ce modèle permet d'envisager la structure logique des arguments explicatifs. De plus, c'est toujours en raison des propriétés caractéristiques d'une telle structure que l'on peut considérer le modèle nomologico-déductif de l'explication comme étant un corollaire de la conception classique des théories scientifiques, en ceci que toute explication qui remplit les conditions que pose un tel modèle (et donc, également, toute prédiction ou toute post-diction) peut être vue comme une déduction permettant de passer d'un certain nombre d'énoncés que l'on peut formuler dans le sous-langage observationnel, L_0 , du langage formel qui sert à reconstruire une théorie donnée – c'est-à-dire les conditions d'application des lois que l'on invoque pour expliquer, prédire ou post-dire le phénomène, ou les phénomènes, en question – à d'autres énoncés de ce même sous-langage – c'est-à-dire la description du phénomène, ou des phénomènes, que l'on veut expliquer, prédire ou post-dire. Pour ce faire, il est nécessaire de se servir de la conjonction de postulats TC qui caractérise la structure de la théorie en question, et qui constitue, dans le cas des explications que l'on peut formuler sur la base d'une telle théorie, la composante nomologique de l'*explanans*. En conséquence, c'est précisément à partir de ces réflexions que nous pouvons en conclure que la contrainte, pour ainsi dire, « épistémologique » de symétrie inférentielle que nous venons de décrire, et qui est exemplifiée par le modèle nomologico-déductif, est liée à la structure bipartite du langage L , et donc à la deuxième thèse empiriste dont parlait Kuhn (1970a), ainsi qu'à la première, car elle a trait aux rapports entre observation et théorisation, en tant que formes de la connaissance que l'on pourrait nettement distinguer l'une de l'autre, dont la conception classique des théories scientifiques présuppose l'existence. Il faut, cependant, ajouter qu'une telle contrainte est également associée à la troisième thèse empiriste que mentionnait Kuhn (1970a), c'est-à-dire la thèse d'après laquelle la nature des théories scientifiques ne se prêterait pas seulement à une

²²⁹ Néanmoins, comme le remarque Marie I. Kaiser (2014) en relation à ce même aspect du modèle nomologico-déductif, « plusieurs exemples jettent un doute sur la capacité du modèle ND [nomologico-déductif] à fournir les conditions suffisantes de l'explication : en particulier, il ignore l'asymétrie de nombreuses explications (on peut expliquer la longueur de l'ombre par celle du mât qui la projette, mais il serait absurde d'expliquer la longueur du mât par celle de l'ombre) ; il ne permet pas d'écarter les descriptions qui incluent une information non pertinente pour l'explication (ainsi, on ne peut pas expliquer que tel homme ne tombe pas enceint en précisant qu'il a pris une pilule contraceptive). On a également objecté que les modèles LC ['loi de couverture'] ne posent même pas de conditions nécessaires. Pourquoi, par exemple, exiger que toute explication convoque des lois ? » (Kaiser 2014, p. 145).

interprétation réaliste, mais également à une interprétation instrumentaliste (Chakravartty 2011), et plus spécifiquement, pourrait-on préciser, à une interprétation qui relèverait d'« un instrumentalisme tourné vers la théorie proprement dite [*'an instrumentalism toward the theory proper'*], c'est-à-dire vers l'unification des régularités expérientielles qui ont été formulées dans le langage théorique [*'toward the unification of experiential regularities that was formulated in the theoretical language'*] », et qui n'affecterait, par conséquent, pas le statut des énoncés d'observation (Uebel 1996, p. 96-97). La raison en est que l'élimination de toute asymétrie ontologique ou épistémique entre *explicans* et *explicandum* qu'implique le modèle nomologico-déductif de l'explication, et donc également la contrainte de symétrie inférentielle, constitue précisément l'un des piliers conceptuels des visions instrumentalistes des théories scientifiques telles que celle que développe, par exemple, Pierre Duhem (1906) dans *La Théorie physique, son objet, sa structure*²³⁰.

En conséquence, c'est justement une telle forme d'instrumentalisme, « tournée vers la théorie proprement dite », que Carnap (1966) considérait, comme nous l'avons vu plus haut, comme étant compatible avec une interprétation réaliste des théories scientifiques, pourvu qu'une telle interprétation réaliste ne comporte aucun engagement métaphysique quant à l'existence objective de telle ou telle classe d'entités abstraites²³¹. Néanmoins, de même que Hempel (1950a), Carnap (1956a,

²³⁰ Plus précisément, Duhem (1906) critiquait toute vision de l'explication comme dévoilement d'une réalité physique qui se cacherait derrière les « apparences sensibles elles-mêmes », qu'elles soient « prises sous forme particulière et concrète » (comme c'est le cas dans la perception sensible), ou qu'elles soient prises « sous forme abstraite et générale » (comme c'est le cas dans les lois expérimentales) (Duhem 1906 ; 2007, p. 27-28). Il y voyait, en effet, l'un des présupposés de la subordination des théories physiques, conçues comme explications, à des systèmes métaphysiques (Duhem 1906 ; 2007, p. 31).

²³¹ D'ailleurs, certains membres du Cercle de Vienne ont défendu des positions ouvertement instrumentalistes, comme, par exemple, Phillip Frank (1932) et Otto Neurath (1932). Dans une étude consacrée au concept de « causalité » et à ses limites, le premier écrit, en effet, que « toutes les sciences ont pour but de prévoir les événements futurs et d'en diriger le cours dans la mesure du possible, à partir des événements immédiatement présentes » (« *Alle Wissenschaften haben das Ziel, aus den unmittelbaren Erlebnissen spätere vorauszusagen und womöglich zu beherrschen* ») (Frank 1932, p. 15). Quant au second, il a défendu, en critiquant Rudolf Carnap (1932b), une conception de la science comme construction linguistique intersubjective et toujours sujette à révision par l'ajout de nouvelles hypothèses, qu'il est nécessaire de mettre en coordination (« *Zuordnung* ») avec les données empiriques sans partir du présupposé qu'il existerait des « énoncés protocolaires » (« *Protokollsätze* »), au sens d'énoncés factuels primitifs qui se rapporteraient directement à quelques éléments constitutifs de la réalité physique ou de la perception. D'après Neurath (1932), les énoncés protocolaires (au sens d'énoncés qui décrivent des perceptions) et non protocolaires devaient, par conséquent, être mis sur un pied d'égalité, en évitant d'accorder toute sorte de priorité ontologique aux premiers : « Dans la science unitaire [*'in der Einheitswissenschaft'*] nous nous efforçons de bâtir un système dénué de contradiction [*'ein widerspruchloses System'*] qui consiste en énoncés protocolaires et en énoncés non protocolaires (lois incluses) [*'Protokollsätze und Nichtprotokollsätze (einschließlich der Gesetze)'*]. Si l'on nous propose maintenant un nouvel énoncé, nous le comparons

1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) estimait aussi qu'il serait une erreur que de réduire, de manière dogmatique, les théories scientifiques au statut de simples outils de systématisation de généralisations et de preuves empiriques, car, quoique ce soit précisément en cela que consiste leur fonction ultime, il n'en demeurerait pas moins vrai que les termes abstraits qu'elles mobilisent, et donc également les concepts qui y sont associés, possèderaient un « surplus de signification » (Hempel 1950a) qui consisterait dans le réseau de relations logiques qu'ils entretiennent les uns avec les autres. D'ailleurs, c'est précisément cet autre présupposé concernant le surplus de signification dont seraient doués les termes, et donc également les concepts, les plus abstraits que mobilisent les théories empiriques qui nous permet d'identifier la troisième contrainte que la conception classique impose, à notre avis, aux théories qui sont reconstruites en son sein, dans le but d'en expliquer les propriétés par opposition à celles qui caractérisent les théories logico-mathématiques. Plus précisément, une telle contrainte est de nature cognitive, puisqu'elle tient à la différence profonde, dont la conception classique des théories scientifique présuppose l'existence, entre ce que l'on pourrait appeler le « statut cognitif » des concepts mathématiques et le statut cognitif des concepts théoriques des sciences empiriques, et notamment des concepts qui relèvent de la physique. Une telle différence consisterait en ceci que les premiers seraient des concepts, pour ainsi dire, « fermés », dans le sens où, comme le rappelait Carnap (1966) lui-même, il serait toujours possible d'en donner « une définition complète et explicite sur la base de la logique pure » (« *a complete, explicit definition on the basis of pure logic* ») – comme l'ont fait Alfred North Whitehead et Bertrand Russell (1910, 1912, 1913) dans le cas du concept de « nombre » (Carnap 1966 ; 1973, p. 230) – ou du moins sur la base d'autres concepts mathématiques. Les seconds seraient, en revanche, des concepts « ouverts », en ceci qu'il serait impossible de les définir, une fois pour toutes, en termes d'opérations empiriques – comme le prétendaient, justement, des physiciens et des philosophes d'orientation « opérationnaliste », tels que Bridgman (1927)²³² – ou d'autres concepts théoriques, voire logico-

avec le système qui est à notre disposition et nous effectuons alors un contrôle pour savoir si ce nouvel énoncé est en contradiction avec le système ou non [*und kontrollieren nun, ob der neue Satz im Widerspruch mit dem System steht*]. Dans le cas où ce nouvel énoncé est en contradiction avec le système, nous pouvons le biffer comme inutilisable ('faux') [*diesen Satz als unverwendbar ('falsch') streichen*] ...Ou bien l'énoncé est 'admissible' [*annehmen*] et le système peut alors être modifié de telle façon qu'augmenté de cet énoncé il reste non contradictoire [*widerspruchslos bleibt*]. On dit alors qu'il est 'vrai' [*Er heiÙe dann 'wahr'*] » (Neurath 1932 ; Soulez 2010, p. 213-214). À ce sujet, voir également Uebel (1996, p. 96-97).

²³² Comme l'explique Pierre Jacob (1980a), Bridgman (1927) maintenait, dans *The Logic of Modern Science (La Logique de la science moderne)*, « qu'un concept ne peut faire partie d'une théorie physique que s'il est 'synonyme d'un ensemble correspondant d'opérations'. Mais cette formulation soulève plus de problèmes qu'elle n'en résout : si à un concept théorique comme 'masse', 'charge électrique' ou 'champ magnétique' on associe plusieurs procédures ou manipulations

mathématiques : pour tout concept donné, il serait, en effet, toujours possible d'identifier de nouveaux protocoles de mesure, de nouvelles expériences ou de nouvelles observations qui seraient susceptibles d'étendre l'éventail des phénomènes qu'un tel concept permet de subsumer sous des énoncés théoriques, et donc d'expliquer, de prédire ou de post-dire, c'est-à-dire de comprendre. Comme le faisait remarquer, encore une fois, Carnap (1966) lui-même, nier cela signifierait, en effet, supposer que la physique, ou toute autre science empirique, serait un jour achevée (Carnap 1966 ; 1973, p. 231)²³³. Il en découle que, tant que la connaissance scientifique du monde physique restera une tâche inachevée, les concepts par l'intermédiaire desquels se produit cette même connaissance resteront, eux aussi, inachevés, c'est-à-dire sujets à un processus continu de modification et de rectification (Bachelard 1969).

Pour ne citer qu'un exemple, l'on peut considérer que la découverte de lois de conservation de grandeurs telles que l'énergie témoigne du caractère ouvert des concepts physiques. En effet, comme le rappelait Thomas Kuhn (1959, 1977), d'une part,

Sadi Carnot, avant 1832, Marc Séguin, en 1839, Karl Holtzmann, en 1845 et G. A. Hirn, en 1854, ont chacun exprimé, de façon indépendante, la conviction que la chaleur et le travail pouvaient s'échanger quantitativement, et ils ont calculé, chacun de leur côté, la valeur du coefficient de conversion [*'all recorded their independent convictions that heat and work are quantitatively interchangeable, and all computed a value for the conversion coefficient'*] (Kuhn 1959, 1977 ; 1990, p. 112) ;

expérimentales, quelle voie suivre ? Devra-t-on affirmer que les mêmes expressions linguistiques désignent autant de concepts différents qu'il y a de procédures expérimentales différentes ? Ou postulera-t-on l'existence d'un 'super-concept', coiffant tous les concepts particuliers définis par des procédures expérimentales différentes, mais lui-même dépourvu de définition opérationnelle ? » (Jacob 1980a, p. 135).

²³³ Comme le suggère Thomas Mormann (2007), il existe de profondes analogies entre la manière dont Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et les autres empiristes logiques concevaient la différence entre concepts empiriques et concepts mathématiques et la manière dont cette dernière est caractérisée par Ernst Cassirer (1910) dans *Substance et fonction (Substanzbegriff und Funktionsbegriff)* : « Face au concept mathématique, se révèle désormais une différence caractéristique [*'charakteristischer Unterschied'*] [qui est propre aux concepts empiriques] : c'est que la construction qui, à l'intérieur de la mathématique, aboutit à sa clôture rigoureuse [*'zu einem festen Ende gelangt'*] demeure, au sein de l'expérience, fondamentalement *interminable* [*'prinzipiell unabschließbar'*]. Nous pouvons bien empiler l'une sur l'autre autant de 'couches' de relations [*'Schichten der Beziehung'*] qu'on voudra et cerner ainsi, de plus en plus près, toutes les circonstances particulières du processus réel [*'alle Einzelumstände des wirklichen Vorgangs'*], la possibilité reste toujours offerte qu'un facteur quelconque, décisif pour le résultat de l'ensemble, ait échappé à l'inventaire et ne puisse être découvert qu'au cours du progrès soutenu de l'analyse expérimentale [*'durch den weiteren Fortschritt der experimentellen Analyse'*] » (Cassirer 1910 ; 1977, p. 288).

d'autre part,

entre 1837 et 1844, C. F. Mohr, William Grove, Faraday et Liebig décrivent tout l'univers des phénomènes [*the world of phenomena*] comme étant gouverné par une 'force' unique [*as manifesting but a single 'force'*], se manifestant sous forme électrique, thermique, dynamique, ou sous d'autres formes encore [*in electrical, thermal, dynamical, and many other forms*], sans qu'elle ne puisse jamais être créée ou détruite [*created or destroyed*] au cours de ces transformations [*transformations*] (Kuhn 1959, 1977 ; 1990, p. 113).

Ce que Kuhn (1959, 1977) décrit dans ces deux passages, ce sont, par conséquent, non seulement deux contributions distinctes à la découverte du principe de la conservation de l'énergie sous ses différentes formes, mais également deux manières complémentaires de se servir du caractère ouvert des concepts de la physique pour accroître notre connaissance du monde. Dans le premier cas de figure, il s'est agi, en effet, d'établir un rapport d'identité, que l'on pouvait mesurer au moyen d'un coefficient de conversion, entre deux grandeurs qui avaient jusqu'alors été considérées comme étant distinctes. C'est précisément cela qui a permis, respectivement, à Carnot (1824), à Séguin (1839), à Holtzmann (1846) et à Hirn (1854) de construire un concept plus général, c'est-à-dire le concept d'énergie, à partir de deux concepts partiels, à savoir les concepts de chaleur et de travail, en montrant, par ce même biais, en quoi il était possible de se servir de l'un pour « achever » l'autre, et inversement. Dans l'autre cas de figure, il s'est agi d'unifier un grand nombre de domaines phénoméniques distincts, à savoir des phénomènes électriques, thermiques dynamiques, etc., en les subsumant sous un concept théorique indéterminé, c'est-à-dire le concept d'une force unique qui se manifesterait sous toutes ces différentes formes. C'est en procédant ainsi que Mohr (1837a, 1837b), Grove (1846), Faraday (1844) et Liebig (1844) ont pu caractériser, dans un premier temps et de manière tout à fait provisoire, le principe de la conservation de l'énergie comme étant un principe dynamique, avant qu'il ne fût possible de rectifier une telle formulation, en précisant qu'il s'agissait d'une propriété générale des phénomènes que l'on peut subsumer sous le concept d'énergie. En conséquence, c'est précisément en raison de la nature inachevée et jamais complètement déterminée des concepts théoriques des sciences empiriques que des tenants de la conception classique tels que Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963 1966 ; Psillos & Carnap 2000), Hempel (1950a, 1950b, 1951, 1952, 1954, 1958, 1965) ou Reichenbach (1958) estimaient, comme nous l'avons déjà vu plus haut, impossible de « figer » les composantes du corps conceptuel de telle ou telle théorie, formellement reconstruite, en leur attribuant des significations définitives. Bien au contraire, ils considéraient qu'il était nécessaire de se servir de règles de coordination et de correspondance, ou plus généralement de

systèmes interprétatifs, afin de rendre compte aussi bien de la généralité de ces mêmes concepts que de leur perfectibilité²³⁴. En d'autres termes, ils considéraient qu'il était nécessaire d'envisager les concepts théoriques comme étant des constructions logiques dont la fonction consisterait à organiser le type particulier de connaissances empiriques qu'expriment, justement, des énoncés mixtes tels que les postulats-C, c'est-à-dire comme étant des constructions logiques qui permettent de se servir d'énoncés d'une telle nature pour établir des connexions nomologiques entre des phénomènes observables.

Nous pouvons donc en conclure que la conception classique des théories scientifiques constitue non seulement un cadre métathéorique et métalinguistique, mais également un cadre conceptuel. Nous pouvons également en conclure que, au sein d'un tel cadre, les règles de correspondance jouent un rôle fondamental en tant que règles de traduction qui permettent de passer des énoncés ou des termes du langage L_T aux énoncés ou aux termes du langage L_O , et inversement. Plus précisément, ce qui nous permet de considérer la conception classique comme étant un cadre conceptuel consiste en ceci qu'elle traduit les trois thèses empiristes dont parlait Kuhn (1970a) en autant de contraintes, de nature substantielle, qui sont imposées au contenu et à la structure des théories scientifiques (empiriques) qui sont reconstruites à son instar, afin de faire ressortir ce qui les distingue des théories logico-mathématiques (formelles). Plus précisément, de telles contraintes concernent, respectivement, les *explananda* des théories scientifiques – et plus précisément les statuts ontologiques des différentes entités, propriétés et relations dont elles rendent compte –, les *explanans* qu'elles mobilisent – et plus précisément les contraintes épistémologiques qui sont exemplifiées par

²³⁴ Un autre exemple de la nature partielle de l'interprétation qu'apportent les postulats-C aux concepts théoriques des sciences empiriques est fourni par Carnap (1966) lui-même : « Considérons par exemple le terme théorique 'température', tel qu'on l'utilise dans la théorie cinétique des molécules [*kinetic theory of molecules*']. Il y a des postulats-C (règles de correspondance) qui relient cette notion avec le mode de fabrication et d'emploi d'un thermomètre [*the construction and use of a thermometer*'], par exemple. Après avoir plongé un thermomètre dans un liquide, on lit la valeur indiquée sur l'échelle graduée. Les postulats-C établissent un lien entre cette procédure et le terme-T 'température' de telle sorte que les lectures effectuées fournissent une interprétation partielle [*partial interpretation*'] de ce terme. Elle est partielle parce que cette interprétation particulière du terme 'température' ne peut être utilisée dans tous les énoncés de la théorie où figure ce terme. Un thermomètre ordinaire n'est utilisable que dans un intervalle étroit de l'échelle des températures. Il existe en effet des températures au-dessous desquelles tout liquide susceptible d'être utilisé passerait à l'état solide et des températures au-delà desquelles tout liquide se vaporiserait. La mesure de pareilles températures exige des procédés totalement différents [*entirely different methods*']. Pour chaque méthode, des postulats-C font la liaison avec le concept théorique [*theoretical concept*'] de 'température'. Pourtant on ne peut pas dire que cela « épuise la signification empirique » (« *exhausts the empirical meaning* ») de « température ». Dans le futur, il se peut que de nouvelles observations donnent naissance à de nouveaux postulats-C qui étendront « l'interprétation empirique » (« *empirical interpretation* ») de ce même concept (Carnap 1966 ; 1973, p. 257-258).

le modèle nomologico-déductif de l'explication –, ainsi que le statut cognitif des concepts qui les caractérisent, par opposition aux concepts formels de la logique et des mathématiques. De plus, une telle conclusion est compatible avec la vision holiste de la conception classique que nous avons inférée des critiques que Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) a adressées au concept carnapien d'énoncé de réduction et, plus généralement, à l'idée que l'on pourrait séparer les composantes factuelles et synthétiques des théories scientifiques, lorsqu'elles sont reconstruites sous la forme de systèmes axiomatiques partiellement interprétés, de leurs composantes purement conceptuelles et analytiques. Comme nous l'avons mis en évidence plus haut, une telle vision de la conception classique des théories scientifiques se fonde sur trois constats que partageaient, à la fois, Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) : premièrement, il faut considérer les postulats que l'on peut utiliser pour formaliser les lois fondamentales qui constituent le corps conceptuel d'une théorie donnée et les postulats, ou plus généralement les énoncés, qui permettent de fournir une interprétation empirique à ces derniers comme constituant un bloc unique ; deuxièmement, le bloc unique que constituent ces deux genres de postulats remplit une double fonction, qui consiste à attribuer une signification empirique, quoique partielle, aux termes du langage théorique de la théorie en question, par opposition à son langage observationnel, et, par ce même biais, à exprimer le contenu empirique et factuel de cette même théorie, c'est-à-dire la manière dont elle permet de représenter la structure qui est propre à l'expérience ; troisièmement, comme ils constituent un bloc unique, il est impossible de déterminer le caractère logique des postulats théoriques en faisant abstraction du caractère logique des postulats d'interprétation, et inversement, c'est pourquoi nous pouvons en conclure que leur conjonction « nous livre donc des énoncés synthétiques » (Carnap 1966 ; 1973, p. 259-260).

Il en découle que, si nous acceptons une vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, nous pouvons concevoir ce que Carnap (1966) appelait la « conjonction de postulats **TC** » comme étant un schéma de pensée, au sens de Quine (1960), qui prend la forme d'un réseau de termes théoriques et de termes observationnels, dont la fonction consiste à imposer, justement, trois types de contraintes à la connaissance empirique que nous pouvons exprimer au moyen de **L_O**. Premièrement, il s'agit d'un schéma de pensée qui contraint la connaissance empirique d'un point de vue ontologique, en ceci qu'il comporte un double critère d'existence qui nous permet de parler des entités, des propriétés et des relations que nous pouvons décrire, justement, par le biais des termes et des énoncés de **L_O** comme s'il s'agissait d'entités, de propriétés et de relations qui existent de manière effective, par opposition aux entités, aux propriétés et aux relations que nous pouvons décrire par le biais des termes et des énoncés de **L_T** et que nous pouvons regarder comme étant des constructions logiques. Deuxièmement, il s'agit d'un schéma de pensée qui contraint la connaissance empirique

d'un point de vue épistémologique, en ceci qu'il fournit un modèle pour la formulation des explications, des prédictions et des post-dictions qui permettent de systématiser, déductivement ou inductivement, les généralisations et les preuves empiriques que l'on peut exprimer, encore une fois, par l'intermédiaire de L_O , c'est-à-dire le modèle nomologico-déductif de l'explication, qui se fonde sur un présupposé de symétrie inférentielle d'après lequel il ne serait possible d'établir aucune différence de nature épistémique ou ontologique entre des formes de connaissance ou des processus physiques différents. Troisièmement, il s'agit d'un schéma de pensée qui contraint la connaissance empirique d'un point de vue conceptuel, en ceci qu'il nous permet d'envisager les concepts théoriques qui relèvent, justement, des sciences empiriques, et que l'on peut donc exprimer par le biais des termes de L_T , comme étant des concepts ouverts, c'est-à-dire comme étant des constructions logiques dont la fonction consiste à organiser ce type particulier de connaissance empirique qu'expriment des énoncés mixtes tels que les postulats-C, en établissant, par ce même biais, des connexions nomologiques entre des phénomènes observables. Ce troisième aspect de l'interprétation holiste de la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre conceptuel, soulève, néanmoins, un problème fondamental, qui consiste, précisément, à savoir si le type de connaissance empirique qu'expriment les énoncés mixtes se distingue effectivement du type de connaissance empirique que l'on peut exprimer en se servant uniquement de termes qui appartiennent à L_O . Autrement dit, s'il était possible, par exemple, de formuler un énoncé de L_O , ou plus précisément de L'_O , dont le contenu factuel coïncide avec celui d'une certaine classe de postulat-C, comme, par exemple, un énoncé universel qui ne contient que des termes empiriques et qui exprime les différentes propriétés observables que l'on peut associer au concept de température, en tant que concept théorique dont la signification empirique est partiellement déterminée par des règles de correspondance, dans telle ou telle situation particulière, faudrait-il en conclure qu'il serait possible de remplacer le postulat en question par de tels énoncés observationnels ?²³⁵ Et si l'on pouvait faire l'économie d'énoncés mixtes

²³⁵ « Supposons, par exemple, que – comme ce sera souvent le cas – les énoncés interprétatifs [*the interpretative sentences*] ont, tout comme les lois qu'énonce la théorie en question [*the laws asserted by the theory*], la forme d'équations qui relient des expressions contenant des quantités théoriques soit à d'autres expressions de la même nature, soit à des expressions qui contiennent des quantités observables [*the form of equations which connect certain expressions in terms of theoretical quantities either with other such expressions, or with expressions in terms of observable quantities*]. Alors l'on peut clarifier un tel problème en empruntant la formulation succincte de Hull : 'Si l'on possède une connexion équationnelle, dont on est sûr, [*a secure equational linkage*] qui va de certaines conditions observables précédentes jusqu'à des conditions observables successives, pourquoi donc utiliser plusieurs équations, quand bien même faire cela ne soulèverait aucun problème évident [*even though to do so might not be positively pernicious*], alors qu'il suffirait d'en utiliser une ?'. Skinner pose la même question, dans une forme plus générale, lorsqu'il critique la construction, dans le cadre de théories psychologiques, de chaînes causales dans lesquelles un premier maillon, qui

tels que les postulats-C, faudrait-il en déduire qu'il serait possible, voire nécessaire, de faire également l'économie des concepts théoriques qui permettent d'organiser ces mêmes postulats ? Il s'agit d'un problème qui a été mis en évidence par Hempel (1958, 1965) lui-même, sous la forme d'un paradoxe, qu'il a appelé le « *paradoxe de la théorisation* » (« *paradox of theorizing* »), ainsi que sous la forme d'un dilemme, qu'il a appelé le « *dilemme du théoricien* » (« *theoretician's dilemma* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 186). Plus précisément, d'une part, ce dilemme affirme que « si les termes et les principes généraux d'une théorie scientifique remplissent efficacement leur fonction [*'serve their purpose'*], c'est-à-dire s'ils établissent des liens bien déterminés entre des phénomènes observables [*'i.e., if they establish definite connections among observable phenomena'*] », alors il est possible d'en faire l'économie, c'est-à-dire de remplacer « toute chaîne de lois et d'énoncés interprétatifs » (« *any chain of laws and interpretative statements* ») permettant d'établir tel ou tel lien entre phénomènes par une généralisation empirique qui exprime ce même lien en reliant « des antécédents observables » (« *observational antecedents* ») à « des conséquents observables » (« *observational consequents* »). D'autre part, il affirme également que si les termes et les principes, pour ainsi dire, « proprement théoriques » qui caractérisent une certaine théorie scientifique ne remplissent pas leur fonction de manière efficace, alors il est certainement possible, voire nécessaire, d'en faire l'économie, d'où l'on peut tirer la conclusion suivante, qui prend, justement, la forme logique d'un dilemme : comme « pour toute théorie donnée, soit ses termes et ses principes remplissent efficacement leur fonction, soit ils ne le font pas » (« *given any theory, its terms and principles either serve their purpose or they do not* »), il en découle que « les termes et les principes de n'importe quelle théorie ne sont pas nécessaires » (« *the terms and principles of any theory are unnecessary* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 186). Mais est-ce que cela signifie que toute tentative d'interpréter la conception classique des théories scientifiques d'un point de vue holiste serait destinée à tomber dans un tel dilemme ? De quelle manière Hempel (1958, 1965) et Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966, Psillos & Carnap 2000) ont-ils essayé de sortir de cette impasse ?

consiste en un événement observable et expérimentalement contrôlable, est relié à un ('troisième') maillon final, de la même nature, par le biais d'un maillon intermédiaire qui ne se prête normalement pas à l'observation, ni au contrôle expérimental [*'causal chains in which a first link consisting of an observable and controllable event is connected with a final ('third') one of the same kind by an intermediate link which usually is not open to observation and control'*] » (Hempel 1958 ; 1965, p. 186).

3.3 Les termes théoriques sont-ils indispensables ? Du dilemme du théoricien à une interprétation structuraliste de la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel

Pour répondre à tous ces questions, nous pouvons partir de la manière dont Hempel (1958, 1965) reformule la première corne du dilemme du théoricien – c'est-à-dire le paradoxe qui a trait au caractère superflu des termes et des énoncés théoriques qui remplissent efficacement leur fonction – en termes plus formels, ce qui nécessite, au préalable, de formaliser le concept même de « fonction » d'une théorie donnée. Considérons, par exemple, un « bloc théorique », ou « *théorie interprétée* » (« *interpreted theory* ») T' (Hempel 1958 ; 1965, p. 211), qui se compose de la conjonction de postulats théoriques T et de la conjonction de postulats, ou énoncés, interprétatifs J ou, pour utiliser la terminologie de Carnap, C (1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000). En quoi consiste, par conséquent, la fonction de T' ? Comme nous l'avons vu plus haut, dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, et notamment de son interprétation holiste, la fonction d'une théorie interprétée T' consiste à systématiser, à la fois déductivement et inductivement, les énoncés que l'on peut formuler dans des langages formels tels que les langages L_O et L'_O , dont parlait Carnap (1956a), pour décrire des entités, des propriétés et des relations qui sont directement observables (du moins relativement aux outils expérimentaux dont disposent les scientifiques que travaillent dans tel ou tel domaine des sciences empiriques). Par « systématisation d'énoncés d'observation », nous entendons ici, en suivant encore une fois Hempel (1958, 1965), la formulation de ces mêmes énoncés en tant que conséquences empiriques de la théorie interprétée T' , au moyen d'inférences qui peuvent prendre, indifféremment, la forme de prédictions, de post-dictions, ou d'explications. La contrainte épistémologique de symétrie inférentielle, dont nous avons parlé plus haut, qu'un langage théorique tel que L_T exerce sur un langage observationnel tel que L_O , et inversement, nous permet d'en conclure, en effet, qu'il n'existe aucune différence essentielle, d'ordre ontologique ou épistémique, entre ces trois types d'inférence, si bien que nous pouvons donner une définition formalisée du concept de « systématisation » qui est la suivante. En ce qui concerne la fonction de systématisation déductive, l'on peut affirmer que la théorie interprétée T' permet de systématiser, à l'aide de l'énoncé observationnel « O_1 », la connaissance empirique qu'exprime l'énoncé observationnel « O_2 », si et seulement si

$$(O_1 \wedge T') \vdash O_2$$

et donc, en vertu de la règle de déduction dite « *Modus ponens* » (que l'on peut formaliser, par exemple, au moyen de l'une des règles d'élimination de connecteurs logiques qui relèvent du système de la déduction naturelle)²³⁶, si et seulement si l'énoncé « $(O_1 \wedge T') \rightarrow O_2$ » est une vérité logique. En ce qui concerne la fonction de systématisation inductive, il faut avant tout observer que, comme nous l'avons déjà suggéré plus haut et comme le remarquait Hempel (1963) lui-même, les énoncés observationnels entre lesquels l'on peut établir des liens déductifs par l'intermédiaire d'une théorie interprétée, T' , donnée ne sont pas nécessairement des énoncés observationnels au sens propre du terme, c'est-à-dire des énoncés factuels particuliers. Bien au contraire, il peut également s'agir d'énoncés tels que « si un objet x est un aimant (si [$A(x)$ ']), alors, chaque fois que n'importe quelle petite quantité, y , de limaille de fer est mise en contact avec x (chaque fois que [$F(x, y)$ ']), alors y adhère à x [$C(x, y)$ '] » (« *if an object x is a magnet (if [$A(x)$ ']) then whenever a small piece y of iron filing is brought into contact with x (whenever [$F(x, y)$ ']) then y clings to x [$C(x, y)$ '] ») (Hempel 1963, p. 700), c'est-à-dire « $(x) A(x) \supset [(y)(F(x, y) \supset C(x, y))]$ ». Cet énoncé n'est, en effet, rien d'autre qu'une généralisation empirique, ou, plus précisément, « une phrase factuelle universelle [*a factual universal sentence*] » (Carnap 1945a ; 2015a, p. 92), qui exprime les relations qui existent des « propriétés élémentaires » (« *elementary properties* »), c'est-à-dire des propriétés que l'on peut exprimer « au moyen [des] prédicats primitifs [*primitive predicates*] » dont se constitue la partie descriptive du langage L en question, ainsi qu'au moyen « des connecteurs ordinaires [*ordinary connectives*] [et élémentaires] de négation, disjonction et conjonction » (Carnap 1945a ; 2015b, p. 87). Cela dit, comment pourrait-on donc se servir d'une généralisation de cette nature, ainsi que de la théorie T' en question, afin d'établir une relation déductive entre deux énoncés observationnels proprement dits ?*

Pour répondre à cette question, nous pouvons prendre en considération une version légèrement modifiée de la « théorie modèle » que décrit Hempel (1963) dans un essai consacré à une appréciation critique de l'œuvre de Carnap (1963) lui-même, et qui se compose de deux énoncés : un postulat d'interprétation, « i », qui n'est rien d'autre que « $(x) A(x) \supset [(y)(F(x, y) \supset C(x, y))]$ », ainsi qu'une seule et unique hypothèse théorique, « t », c'est-à-dire l'énoncé « les deux moitiés que l'on

²³⁶ Il s'agit, plus précisément, de la « règle d'élimination de l'implication » ($\rightarrow E$), c'est-à-dire

$$\frac{\varphi \quad (\varphi \rightarrow \psi)}{\psi}$$

Comme le remarque Pierre Wagner (2014), « selon cette règle (dans laquelle on reconnaît le *Modus ponens*), on peut dériver ψ des prémisses φ et $(\varphi \rightarrow \psi)$ » (Wagner 2014, p. 225).

obtient en coupant au milieu un aimant en forme de tige sont, à leur tour, des aimants » (« *the parts obtained by breaking a rod-shaped magnet in two are again magnets* ») (Hempel 1963, p. 700). Cette hypothèse théorique permet, en effet, d'établir un lien déductif entre deux énoncés factuels, à savoir l'énoncé, « o_1 », c'est-à-dire « l'on a obtenu les objets b et c en coupant au milieu l'objet a , et a était un aimant en forme de tige » (« *objects b and c were obtained by breaking object a in two, and a was a magnet and rod-shaped* »), d'une part, et l'énoncé, « o_2 », c'est-à-dire « si d est une certaine quantité de limaille qui est mise en contact avec b , alors d va adhérer à b » (« *if d is a piece of iron filing that is brought into contact with b then d will cling to b* »), d'autre part (Hempel 1963, p. 700). Plus précisément, « h » permet de déduire « o_2 » à partir d'« o_1 », bien que ce dernier ne soit pas un énoncé observationnel au sens propre du terme, puisqu'il contient le prédicat dispositionnel « être un aimant », « A ». Il en découle que, si l'on voulait utiliser l'hypothèse « t » et le postulat « i » pour établir une connexion déductive entre deux énoncés observationnels proprement dits, il serait nécessaire de réduire le prédicat « A » à une combinaison de prédicats observationnels, tels que, justement, « F » et « C ». Cela n'est, cependant, pas possible, vu que, en tant qu'énoncé d'interprétation, le postulat « i » ne nous fournit « qu'une condition nécessaire, mais non suffisante » (« *only a necessary, but not a sufficient, condition* ») (Hempel 1963, p. 701), pour l'application du prédicat « A ». C'est précisément afin de résoudre un tel problème que l'on peut avoir recours à la fonction de systématisation inductive que remplit la théorie en question (c'est-à-dire la conjonction « $(t \wedge i)$ »). Mais en quoi consiste, donc, une telle fonction ? Pour répondre à cette autre question, nous devons introduire un concept que Carnap (1945a) a formulé dans le contexte de ses études sur la logique inductive, c'est-à-dire le concept d'« *instance qualifiée de confirmation* » (« *qualified-instance of confirmation* ») d'un énoncé universel donné – qui est, dans notre cas, le postulat « i » – « sur la base de la donnée [empirique] » (« *on the base of evidence* »), c'est-à-dire de l'énoncé observationnel proprement dit, « e », qui décrit les propriétés d'un certain « échantillon » (« *sample* ») d'objets (Carnap 1945a ; 2015b, p. 95-96)²³⁷. Plus précisément, afin de définir un tel concept, nous allons reformuler le postulat « i » de la manière suivante : « pour tout objet x , si x possède la propriété physique ' A ', alors il possède également la propriété expérimentale ' E ' », où la propriété expérimentale « E » n'est rien d'autre que la propriété qu'exprime la fonction prédicative « $(y)(F(x, y) \wedge C(x, y))$ », alors que la propriété physique « A » est, encore une fois, la propriété « être un aimant ». L'instance qualifiée du postulat « i » ainsi reformulé, que nous appellerons « i' », n'est rien d'autre que le degré de confirmation, « c_{qi}^* », de l'hypothèse « h' » que le prochain objet

²³⁷ Je me limiterai à observer ici que c'est précisément un tel concept qui a fait l'objet des débats sur la validité des méthodes de confirmation inductive qui se sont tenus entre Popper (1959, 1963) et Carnap (1963).

observé, x , que l'on considère comme possédant la propriété physique « A » possèdera également la propriété expérimentale « E ».

En langage symbolique, ce que nous venons d'affirmer se traduit ainsi. « Soit [a] une constante d'individu quelconque n'apparaissant pas dans e [*any individual constant not occurring in e*] ; soit j un énoncé disant que [a possède la propriété ' A '], et h' [justement l'hypothèse que ' a possède la propriété ' E ']. Alors l'instance qualifiée de confirmation de ' i ' relativement à [*with respect to*] [A] et [E] sur la base de la donnée e est définie de la façon suivante » :

$$c_{qi}^*(\text{"A"}, \text{"E"}, e) \stackrel{\text{def}}{=} c^*(h', e \wedge j) = 1 - \frac{s_1 + w_1}{s_1 + w_1 + s_2 + w_2}$$

(Carnap 1945a ; 2015b, p. 96) où w_1 est la « largeur » (« *width* ») (Carnap 1945a ; 2015b, p. 89) du prédicat qui exprime la propriété « $A \wedge \sim E$ », c'est-à-dire le nombre de prédicats primitifs ou de négations de prédicats primitifs dont il se compose, w_2 est la largeur du prédicat qui exprime la propriété « $A \wedge E$ », s_1 est le nombre d'objets de l'échantillon que décrit l'énoncé observationnel « e » qui possèdent la propriété « $A \wedge \sim E$ », c'est-à-dire le nombre d'objets de l'échantillon que l'on considère, à priori, comme étant des aimants mais qui ne possèdent pas la propriété expérimentale « E », et s_2 est le nombre d'objets de ce même échantillon qui possèdent la propriété « $A \wedge E$ », c'est-à-dire le nombre d'objets de l'échantillon que l'on considère comme étant des aimants et qui possèdent, effectivement, la propriété expérimentale « E ». En conséquence, nous pouvons considérer que la valeur de $c_{qi}^*(\text{"A"}, \text{"E"}, \{e_i\})$, calculée sur la base d'une classe d'énoncés observationnels $\{e_i\}$, nous donne une mesure de la probabilité (inductive) que l'énoncé « o'_1 », c'est-à-dire l'énoncé « l'objet a , en forme de tige, est un aimant », soit une définition correcte de la nature de l'objet a , en ceci qu'elle nous donne une mesure de la probabilité (inductive) que ce dernier possède effectivement les propriétés que nous pouvons considérer, sur la base du postulat « i », comme étant les conditions nécessaires afin que tel ou tel objet soit un aimant. Il en découle que, comme l'écrivait, encore une fois, Hempel (1963) lui-même, c'est en procédant par deux étapes que la théorie interprétée « ($t \wedge i$) » nous permet de systématiser les informations factuelles qu'exprime l'énoncé observationnel « o_2 », c'est-à-dire, encore une fois, l'énoncé « si d est une certaine quantité de limaille qui est mise en contact avec b , alors d va adhérer à b », à l'aide de l'énoncé observationnel « o''_1 », c'est-à-dire l'énoncé « l'on a obtenu les objets b et c en coupant au milieu l'objet a », ainsi que, justement, à l'aide de l'énoncé « o'_1 », qui n'est pas observationnel, du moins à proprement parler, mais auquel nous pouvons, néanmoins, attribuer, comme nous venons de le voir, un certain degré de confirmation empirique : la première étape consiste, ainsi, dans l'« étape inductive » (« *inductive step* ») qui nous

permet d'assigner à l'énoncé « non observationnel » (« *non-observational* ») « o'_1 » tel ou tel degré de confirmation empirique, de telle sorte que nous puissions nous en servir, comme prémisse, dans l'étape successive, qui consiste, précisément, « dans l'application strictement déductive de la théorie en question » (« *in the strictly deductive application of the given theory* ») (Hempel 1963, p. 701), dans le but d'en déduire l'énoncé observationnel « o_2 ». Par conséquent, c'est précisément en procédant d'une telle manière que nous pouvons formaliser le concept de « fonction d'une théorie donnée », tel qu'on peut le définir dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, ou, plus précisément, dans le cadre de la reconstruction d'une telle conception que nous avons effectuée dans les chapitres précédents. Mais en quoi cette formalisation nous permet-elle de mieux comprendre le paradoxe de la théorisation dont parlait Hempel (1958, 1965) ?

Pour répondre à une telle question, il est nécessaire de se concentrer sur la fonction de systématisation déductive. Comme nous venons de le voir, en effet, afin que l'on puisse affirmer que la théorie interprétée T' permet de systématiser, à l'aide de l'énoncé observationnel « O_1 », les informations factuelles qu'exprime l'énoncé observationnel « O_2 », il faut que l'énoncé « $(O_1 \wedge T') \rightarrow O_2$ » soit logiquement vrai. Cela implique, néanmoins, que l'énoncé « $T' \rightarrow (O_1 \rightarrow O_2)$ » doit être considéré comme étant, lui aussi, logiquement vrai²³⁸, et donc que $T' \vdash (O_1 \rightarrow O_2)$, toujours en raison de la règle du *Modus ponens*. Nous pouvons définir, par conséquent, la classe des « *théorèmes- V_B* » (« *V_B -theorems* »), ou des « *conséquences- V_B* » (« *V_B -consequences* »), de la théorie interprétée T' , $O_{T'}$, (Hempel 1958 ; 1965, p. 211), comme étant la classe de tous les énoncés de la forme « $(O_1 \rightarrow O_2)$ » qui établissent des liens nomologiques entre des énoncés observationnels – qu'il s'agisse d'énoncés observationnels proprement dits ou de généralisations empiriques – sans l'intermédiaire d'aucun terme théorique – c'est-à-dire sans l'intermédiaire d'aucun terme qui relève du vocabulaire V_T , par opposition au « vocabulaire de base » (« *basic vocabulary* ») V_B , ou au vocabulaire observationnel V_O – et qui sont, en même temps, des conséquences logiques de T' . Comme l'observe Hempel (1958, 1965) lui-même, l'on peut montrer, en se servant, encore une fois, de la règle du *modus ponens*, que $O_{T'}$ est « *fonctionnellement équivalent* » (« *functionally equivalent* ») à T' , du moins en ce qui concerne la fonction de systématisation déductive²³⁹. Il en découle que

²³⁸ En effet, si l'énoncé « $(O_1 \wedge T') \rightarrow O_2$ » est logiquement vrai, alors il est impossible que « O_2 » soit faux lorsque « O_1 » et T' sont tous les deux vrais, ce qui exclut, précisément, la seule condition de vérité qui pourrait rendre faux l'énoncé « $T' \rightarrow (O_1 \rightarrow O_2)$ ».

²³⁹ Plus précisément, l'on peut montrer qu'il est possible d'effectuer la même « transition déductive » (« *deductive transition* ») entre « O_1 » et « O_2 » que l'on peut accomplir au moyen de la théorie interprétée T' en remplaçant cette dernière par l'énoncé « $(O_1 \rightarrow O_2)$ » (Hempel 1958 ; 1965, p. 211). En effet, comme « $T' \rightarrow (O_1 \rightarrow O_2)$ » est logiquement

la fonction de systématisation déductive d'énoncés qui sont exprimés dans les termes d'un vocabulaire de base V_B [*the deductive systematization...among sentences expressed in terms of a basic vocabulary*] qu'accomplit une théorie interprétée T' est exactement la même [*exactly the same*] que celle qu'accomplit la classe $O_{T'}$, des énoncés (théorèmes) de T' que l'on peut exprimer exclusivement au moyen de termes de V_B [*the set $O_{T'}$, of those sentences (theorems) of T' which can be expressed in terms of V_B alone*]. Dans ce sens-là, il est possible de faire l'économie [*dispense with*] des termes théoriques qui sont utilisés dans le système de postulats T (Hempel 1958 ; 1965, p. 211).

Nous pouvons donc en conclure que, du moins en ce qui concerne la fonction de systématisation déductive, il est possible de remplacer toute théorie interprétée T' par la classe $O_{T'}$, correspondante, et donc, du moins en principe, de reformuler la théorie en question de telle sorte qu'elle ne contienne aucun terme théorique. Une telle conclusion paraît, par ailleurs, d'autant plus justifiée si l'on adopte une vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, et donc si l'on considère que les énoncés dont se constitue T' sont, au même titre que les énoncés observationnels, de nature synthétique, quoique plus éloignés de l'expérience empirique. C'est ainsi que le paradoxe de la théorisation et le dilemme du théoricien, tels que le présentait Hempel (1958, 1965) lui-même, soulèvent le problème pratique d'identifier une méthode qui permette de remplacer une certaine théorie interprétée T' par un système de postulats qui y soit équivalent, mais qui soit, en même temps,

vrai, il en découle que si la théorie interprétée T' est vraie – et donc, justement, si elle constitue une représentation adéquate des phénomènes qu'elle est censée systématiser –, alors il est nécessaire que l'énoncé « $(O_1 \rightarrow O_2)$ » le soit aussi, si bien que, quels que soient « O_1 » et « O_2 », l'on peut affirmer que $\frac{O_1 \rightarrow (O_1 \rightarrow O_2)}{O_2}$. En conséquence, pour tous les énoncés observationnels « O_1 » et « O_2 », si $(O_1 \wedge T') \vdash_{DN} O_2$ et $T' \vdash_{DN} (O_1 \rightarrow O_2)$, alors il en découle que $(O_1 \wedge (O_1 \rightarrow O_2)) \vdash_{DN} O_2$ et, trivialement, que $(O_1 \rightarrow O_2) \vdash_{DN} (O_1 \rightarrow O_2)$. D'une part, cela signifie que la classe de tous les énoncés de la forme « $(O_1 \rightarrow O_2)$ » permet d'effectuer toutes les transitions déductives entre énoncés observationnels que permet d'accomplir la théorie interprétée T' . D'autre part, cela signifie aussi qu'une telle classe permet d'effectuer exclusivement les transitions déductives que l'on peut accomplir au moyen de T' , car, afin qu'on puisse l'utiliser pour déduire l'énoncé observationnel « O_j » à partir de l'énoncé observationnel « O_i », il est nécessaire que l'énoncé « $(O_i \rightarrow O_j)$ » en soit une conséquence logique, mais tout énoncé de cette forme que l'on peut inférer d'une telle classe est, comme nous venons de le voir, également une conséquence logique de la théorie interprétée correspondante, et inversement (Hempel 1958 ; 1965, p. 211). La classe de tous les énoncés de la forme « $(O_1 \rightarrow O_2)$ » n'est, cependant, rien d'autre que la classe de toutes les conséquences empiriques de la théorie interprétée en question, $O_{T'}$, et donc c'est précisément pour une telle raison que l'on peut affirmer que cette dernière est fonctionnellement équivalente à T' , du moins en ce qui concerne la fonction de systématisation déductive.

complètement dénué de termes et d'énoncés théoriques, et que l'on pourrait appeler T'_B . Cela dit, en quoi pourrait donc consister une telle méthode ? De quelle manière pourrait-elle nous permettre de comprendre quelles sont les raisons pour lesquelles Carnap (1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par récuser toute vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, et donc par réaffirmer la distinction entre les composantes synthétiques d'une théorie donnée et ses composantes analytiques ? En quoi consiste, plus précisément, la vision de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre conceptuel que l'on peut déduire de la manière dont Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a tâché d'élucider une telle distinction, par opposition à la vision holiste que nous avons décrite dans les sections précédentes ?

Afin de répondre à de telles questions, nous analyserons, dans un premier temps (3.3.1), les différentes interprétations qu'ont données Hempel (1958, 1963, 1965) et Carnap (1963) de deux méthodes dont on peut se servir pour éliminer les termes abstraits, ou proprement théoriques, qui figurent dans une théorie donnée, à savoir la procédure de réaxiomatisation de théories déjà formalisées qu'a proposée William Craig (1953, 1956) et la construction de ce qu'on appelle les « énoncés de Ramsey (1929, 1931) ». Nous nous concentrerons tout particulièrement sur cette seconde méthode, qui consiste à remplacer une théorie interprétée T' par un énoncé que l'on peut formuler en joignant, les uns aux autres, les différents postulats (théoriques ou interprétatifs) dont se compose cette dernière et en remplaçant les termes théoriques qui y figurent par des variables existentiellement quantifiées, d'ordre supérieur au premier. Hempel (1958, 1965) avançait, en effet, qu'une telle méthode ne permettrait pas d'éliminer les termes théoriques de manière effective, car la quantification existentielle de variables d'ordre supérieur au premier comporterait tout de même un engagement ontologique consistant à accepter l'existence d'entités non observables. Carnap (1963) considérait, au contraire, que les entités auxquelles font référence les variables quantifiées que l'on retrouve dans les énoncés de Ramsey (1929, 1931) ne seraient rien d'autre que des constructions logico-mathématiques « physiquement caractérisées », c'est-à-dire dont les propriétés et les relations logiques, qu'elles entretiennent les unes avec les autres, seraient déterminées par la structure de l'expérience que représentent les postulats d'interprétation (ou de correspondance), ainsi que par la structure conceptuelle que représentent les postulats théoriques. C'est ainsi que, dans un deuxième temps (3.3.2), nous verrons en quoi Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) s'est servi des énoncés de Ramsey (1929, 1931) afin de proposer une manière d'envisager la formalisation des théories scientifiques, alternative à celle qui consiste à formuler un système de postulats théoriques et de correspondance TC , qui permette, justement, de tracer une ligne de démarcation entre les énoncés synthétique, d'une part, et les énoncés analytiques, d'autre part. Plus précisément, une telle formalisation revient à représenter le contenu empirique et le contenu conceptuel d'une théorie

donnée sous la forme d'une conjonction de trois classes de postulats, à savoir une classe de postulats de signification pour les termes observationnels, A_O , une classe de postulats de signification pour les termes théoriques, A_T , et une classe de postulats « synthétiques » permettant de définir le contenu empirique de la théorie en question, P , ce qui pose, néanmoins, la question suivante : comment serait-il possible de formuler des postulats de signification pour des termes qui relèvent d'un langage théorique, au vu de tous les problèmes que nous avons évoqués dans les sections précédentes ? C'est précisément afin de répondre à une telle question que nous verrons en quoi Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a tâché de montrer que l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) d'une théorie, TC , donnée, c'est-à-dire ${}^R TC$, n'est rien d'autre que l'*explicatum* de la conjonction des postulats P à l'aide desquels on peut formaliser le contenu empirique de la théorie en question, ainsi que de montrer que la classe de postulats A_T qui permet de définir, toujours d'un point de vue formel, le contenu conceptuel de cette dernière se réduit à un énoncé qui contient ${}^R TC$ et que l'on peut qualifier d'énoncé de Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), c'est-à-dire ${}^R TC \supset TC$. Nous verrons en quoi une telle définition des classes de postulats P et A_T constitue le fondement d'une métathéorie syntaxique des théories scientifiques qu'il est possible de considérer comme faisant partie intégrante d'une vision, pour ainsi dire, « dichotomique » de la conception classique, dont le but consiste, précisément, à départager les composantes analytiques des théories qui sont reconstruites à l'instar de cette dernière de leurs composantes synthétiques, ainsi qu'à déterminer la manière dont ces deux types de composantes s'articulent l'un à l'autre. Cela dit, en quoi cette vision dichotomique nous permettrait-elle d'envisager la conception classique comme étant également un exemple paradigmatique de cadre conceptuel ? C'est précisément afin de répondre à cette dernière question que nous verrons, dans un troisième temps (3.3.3), en quoi Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) a utilisé les énoncés de Ramsey (1929, 1931) et ses énoncés éponymes dans le but de proposer également une troisième façon de formaliser les théories scientifiques. Plus précisément, ce troisième formalisme est le résultat de l'introduction, dans le langage formel de la conception classique, de deux opérateurs logiques sémantiquement indéterminés, à savoir les opérateurs logiques « ε » et « ι », dont la fonction consiste à éliminer les termes théoriques en en donnant des définitions explicites, car inconditionnelles, mais non pas entièrement déterminées, dans un langage observationnel étendu. En cela, il nous permet de comprendre que l'interprétation dichotomique de la conception classique que prônait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) est également une interprétation structuraliste, pourvu que, par « structuralisme », l'on entende la thèse d'après laquelle les véritables objets de nos connaissances seraient les relations que l'on peut établir, au moyen des outils de la logique formelle, entre des contenus observationnels. Par conséquent, c'est précisément à partir d'une analyse de cette vision structuraliste de la conception classique que nous clarifierons

les raisons pour lesquelles cette conception se laisse envisager comme étant un cadre conceptuel qui comporte les trois contraintes, de nature, respectivement, ontologique, épistémologique et cognitive dont nous avons parlé plus haut.

3.3.1 La méthode de Craig et les énoncés de Ramsey : deux procédures effectives pour l'élimination des termes théoriques ?

Dans son article sur le dilemme du théoricien, Hempel (1958, 1965) prend en considération deux méthodes particulières dont la fonction est, justement, de remplacer tel ou tel système d'énoncés par un système équivalent, où ne figure, cependant, aucune expression théorique – qu'il s'agisse d'un terme ou d'un énoncé entier. La première de ces méthodes consiste dans la procédure de « réaxiomatisation » de théories déjà formalisées, afin d'en éliminer les expressions dont on peut juger qu'elles ne sont pas indispensables, qu'a proposée William Craig (1953, 1956) dans deux articles intitulés, respectivement, « *Sur l'axiomatisabilité au sein d'un système* » (« *On Axiomatizability Within a System* ») (Craig 1953) et « *La substitution d'expressions auxiliaires* » (« *Replacement of Auxiliary Expressions* ») (Craig 1956). Il s'agit, plus précisément, d'une procédure qui vise à apporter une « solution » (« *solution* »), quoique purement théorique, à ce que ce Craig (1953, 1956) lui-même appelait des « programmes de substitution » (« *replacement programs* ») d'« expressions auxiliaires » (« *auxiliary expressions* ») par des « expressions non auxiliaires » (« *nonauxiliary expressions* »). Par « programme de substitution », il entendait, en effet, toute tentative de reformuler une théorie, *T*, donnée en substituant des expressions que l'on peut considérer comme ayant une référence concrète, et donc un véritable contenu factuel – en ceci qu'elles renvoient à des « entités directement observables » (« *directly observable entities* ») –, à toutes les expressions de *T* que l'on peut regarder comme étant, tout simplement, des « dispositifs symboliques utiles » (« *useful symbolic devices* ») pour organiser et pour mettre en relation entre elles des expressions du premier type (Craig 1956, p. 38). Des exemples en sont le terme « électron », du moins pour les physiciens opérationnalistes tel Bridgman (1927), ou les « variables instrumentales » (« *intervening variables* ») dont parlent les psychologues comportementalistes (Craig 1956, p. 38). La solution, ou plutôt le schéma de solution, que Craig (1953, 1956) présente dans ses articles présuppose deux conditions qui en limitent, néanmoins, l'applicabilité, comme l'admettait l'auteur lui-même : premièrement, la possibilité d'établir une « dichotomie effective » (« *effective dichotomy* ») entre la classe des expressions de *T* que l'on peut considérer comme étant auxiliaires et celle des expressions de *T* qui sont, en revanche, non auxiliaires, c'est-à-dire la possibilité de définir une règle qui permette à n'importe qui de décider, « en un nombre fini d'étapes » (« *in a finite number of steps* »), si telle ou

telle expression appartient à la première ou à la seconde classe (Craig 1956, p. 39) ; deuxièmement, la possibilité de systématiser (« *systematization* ») la théorie T en question, c'est-à-dire la possibilité de la reconstruire en tant que « système formel » (« *formal system* »), S , qui soit doté d'un ensemble de règles syntaxiques, notamment d'un ensemble de règles de « démonstration » (« *proof* »), et dont « les théorèmes constituent ce que l'on considère comme étant les énoncés vrais » (« *whose theorems constitute what one regards as the true assertions* ») de T elle-même (Craig 1956, p. 41)²⁴⁰. C'est ainsi que, si l'on accepte ces deux conditions, on est contraint d'en conclure que résoudre un problème de substitution signifie reformaliser et réaxiomatiser la théorie, T , en question, en remplaçant, justement, le système formel S dont on peut se servir pour en fournir une première systématisation par un second système, S^* , qui remplisse deux conditions de « consistance » (« *consistency* ») et de « complétude » (« *completeness* ») particulières (Craig 1956, p. 44-45) : (i) tous les théorèmes de S qui ne contiennent pas d'expressions auxiliaires sont également des théorèmes de S^* , et tous les théorèmes de S^* sont, tout simplement, des théorèmes de S qui ne contiennent que des expressions non auxiliaires ; (ii) la « logique » (« *logic* ») – c'est-à-dire l'ensemble d'axiomes logiques, de théorèmes logiques (c'est-à-dire qui ne contiennent aucun terme descriptif) et de règles d'inférence – , L^* , sur laquelle repose le système S^* n'est rien d'autre qu'une restriction de la logique L , de S , sur S^* (Craig 1956, p. 44-45).

Quant à l'autre méthode que considérait Hempel (1958, 1965), elle consiste en ce que l'auteur appelait lui-même la construction de l'« énoncé de Ramsey associé à une certaine théorie » (« *the Ramsey-sentence associated with a given theory* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 216), c'est-à-dire dans la procédure de reconstruction formelle que Frank Ramsey (1929, 1931) a présentée dans un article consacré, justement, à la nature des théories scientifiques. Plus précisément, Ramsey (1929, 1931) concevait toute théorie scientifique comme étant, pour ainsi dire, un « langage-théorie », c'est-à-dire un « langage dans lequel sont campées [des] assertions » (« *a language in which [the judgments in question] are clothed* ») qui portent sur les faits dont la théorie vise à rendre compte, par exemple sur

²⁴⁰ Plus précisément, Craig (1956) identifie sept « conditions que tout système formel S doit satisfaire » afin qu'on puisse le considérer comme étant une « formalisation adéquate » (« *adequate formalization* ») d'une théorie donnée : « (i) La classe des applications d'une règle d'inférence [*'The class of applications of a rule of inference'*] de S est définie de manière effective [*'effectively defined'*] [c'est-à-dire au moyen de règles finies et bien déterminées]. (ii) La classe des axiomes logiques [*'The class of logical axioms'*] de S est définie de manière effective. (iii) La classe des axiomes extra-logiques [*'The class of extralogical axioms'*] de S est définie de manière effective. (iv) La classe des énoncés [*'The class of sentences'*] de S est définie de manière effective. (v) Tout axiome [*'any axiom'*] de S est soit de nature logique, soit de nature extra-logique [*'either logical or extralogical'*]. (vi) Aucun axiome de S ne peut être à la fois logique et extra-logique. (vii) Tout théorème [*'Any theorem'*] de S est un énoncé de S » (Craig 1956, p. 42).

une suite de phénomènes empiriques, et que l'on peut utiliser « sans avoir à en expliciter toutes les lois et les conséquences » (« *without working out the laws and consequences* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 271). D'un tel point de vue, tout comme de celui de Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), une théorie donnée consiste en deux volets distincts, à savoir un « système primaire » (« *primary system* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 255), qui tient lieu de langage de base permettant de décrire les phénomènes qui en font l'objet, et un « système secondaire » (« *secondary system* »), ou « construction théorique » (« *theoretical construction* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257), qui constitue, encore une fois, une sorte de superstructure syntaxique dont on peut se servir pour formuler les différents jugements que l'on peut porter sur ces mêmes phénomènes. De même que le langage L_O dont parlait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et le vocabulaire de base, V_B , de Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), le système primaire de Ramsey (1929, 1931) prend la forme d'un langage qui contient tous les termes élémentaires (tels que les noms « *a* », « *b* », ..., « rouge », « après », etc.) de l'univers du discours qui représente le domaine empirique de la théorie que l'on veut reconstruire, ainsi que les énoncés atomique que l'on peut construire en combinant des termes élémentaires « de différents types » (« *of different types* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 255), au moyen de connecteurs logiques élémentaires, dans le but de représenter tel ou tel état de choses particulier. En même temps, Ramsey (1929, 1931) proposait, néanmoins, une « procédure de notation numérique » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 256) permettant de traduire tous les termes élémentaires et tous les énoncés atomiques d'un système primaire donné, respectivement, en nombres entiers et en fonctions de nombres entiers, si bien que les énoncés que l'on peut construire, toujours au sein du système primaire, en combinant plusieurs énoncés atomiques, prennent la forme d'« assertions sur les valeurs uniques que prennent certaines fonctions numériques » (« *assertions about the values taken by certain one-valued numerical functions* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257). La condition de possibilité d'une telle traduction consiste en ceci que la fonction de tout système primaire, en tant que langage qui est censé représenter l'expérience empirique, consiste à décrire les propriétés de structures empiriques en tant que relations d'ordre entre les éléments qui les constituent, c'est-à-dire en tant que relations qui se prêtent à une représentation numérique²⁴¹. Un exemple d'énoncé atomique qu'il est possible d'exprimer sous la forme d'une fonction de nombres entiers, dans le cadre d'un système primaire qui décrit une suite temporelle d'expériences sensorielles, est l'énoncé « La troisième couleur que perçoit

²⁴¹ « Les termes de notre système primaire forment une structure et toute structure peut être représentée par des nombres (ou par des paires de nombres ou autres combinaisons de nombres) » (« *The terms of our primary system have a structure, and any structure can be presented by numbers (or pairs or other combinations of numbers)* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 256).

le sujet est la couleur rouge ». Pour effectuer une telle traduction, nous pouvons nous servir, en effet, d'une fonction de la forme « $\varphi(x) = y$ », dont le domaine est l'ensemble des nombres entiers \mathbb{Z} – en ceci qu'on peut utiliser de tels nombres pour énumérer les éléments d'une suite temporelle en fonction de leur distance par rapport à un instant $t = 0$ – et dont le codomaine est le sous-ensemble de \mathbb{Z} que l'on peut utiliser pour décrire la structure du spectre des couleurs visibles. C'est ainsi que tous les énoncés atomiques d'un système primaire donné sont des énoncés de la forme « $A(n)$ », « $B(m, n)$ », etc., où « m, n, \dots prennent des valeurs entières positives ou négatives sujettes à toutes les restrictions que l'on veut [*take positive or negative integral values subject to any restrictions*'], comme, par exemple, celle où le m de $B(m, n)$ ne pourrait prendre que les valeurs $\{1, 2\}$ » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257), et dont on peut se servir pour éliminer de la notation numérique tous les énoncés qui sont logiquement faux.

Par conséquent, c'est précisément sur le modèle d'une telle procédure de notation que l'on peut introduire d'autres « fonctions propositionnelles » (« *propositional functions* ») ayant pour arguments des entiers naturels, c'est-à-dire des fonctions qui sont de la forme « $\alpha(n)$ », « $\beta(n)$ », « $\gamma(m, n)$ », ... et qui constituent la base des énoncés du système secondaire. Comme l'écrivait Ramsey (1929, 1931) lui-même, en effet, « nous entendrons par propositions du système secondaire [*propositions of the secondary system*] toute fonction de valeur de vérité [*any truth-functions*] définie sur les valeurs de $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257). De même que dans le cas des arguments que prennent les fonctions qui relèvent de la notation mathématique du système primaire, les valeurs que l'on peut attribuer aux fonctions propositionnelles qui forment la base du système secondaire sont sujettes à des restrictions, qui s'expriment, justement, sous la forme d'« axiomes » (« *axioms* »), tels que, par exemple, la formule « $(n). \overline{\alpha(n)}. \overline{\beta(n)}$ »²⁴², d'où l'on peut déduire, par la suite, d'autres formules, qui prennent la forme de « théorèmes » (« *theorems* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257). En outre, tout comme pour les systèmes de formules partiellement interprétées que décrivaient, encore une fois, Carnap (1956a, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) et Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), les deux volets dont se compose une théorie qui est reconstruite sous la forme d'un langage-théorie, d'après les indications de Ramsey (1929, 1931), sont reliés l'un à l'autre par un « dictionnaire » (« *dictionary* »). Ce dernier consiste, plus précisément, dans un système d'équations qui relie les différentes fonctions propositionnelles « α », « β », « γ », etc., qui constituent les termes du système secondaire, aux fonctions numériques

²⁴² Dans le formalisme qu'adopte ici Ramsey (1929, 1931), le signe « $\overline{\quad}$ » dénote la négation, en tant que connecteur logique élémentaire, alors que le signe « \cdot » entre deux énoncés dénote la conjonction, toujours en tant que connecteur logique élémentaire.

du système primaire – comme, par exemple, l'équation « $A(n) = \alpha(n) \cdot \gamma(0, n^2)$ » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 258)²⁴³. En conséquence, il joue deux rôles complémentaires : d'une part, il permet de préciser la signification empirique des termes du système secondaire (fonction d'interprétation), d'autre part, il permet de « déduire des propositions dans le système primaire [*deduce propositions in the primary system*'] que nous appellerons des *lois* [*laws*'] si elles sont des propositions générales, et des *conséquences* [*consequences*'] si ce sont des propositions singulières » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 258) (fonction de systématisation de la connaissance empirique). Il en découle que, telles que les concevait Ramsey (1929, 1931), les théories scientifiques en tant que systèmes formels ne sont rien d'autre que des outils syntaxiques permettant de formuler des énoncés qui portent sur tel ou tel domaine structuré de phénomènes, ou plus précisément sur l'univers du discours qui représente ce dernier. C'est pourquoi il pouvait en conclure que la meilleure façon de les formuler est la suivante, qui correspond exactement à ce que Hempel (1958, 1965) appelait un « énoncé de Ramsey (1929, 1931) » :

$$(\exists \alpha, \beta, \gamma, \dots)(\text{dictionnaire. axiomes})$$

(Ramsey 1929 ; 2003, p. 271) où « α », « β », « γ », ... sont des symboles de variables qui dénotent les termes du système secondaire de la théorie en question et la conjonction « (*dictionnaire. axiomes*) » représente, justement, un tel système. En conséquence, un énoncé de Ramsey (1929, 1931) n'est rien d'autre qu'une procédure qui permet d'éliminer les termes théoriques que contient une certaine théorie en les transformant en variables existentiellement quantifiées, et plus précisément en variables existentiellement quantifiées du deuxième degré qui ne sont rien d'autre que des fonctions des termes du système primaire, c'est-à-dire de termes observationnels²⁴⁴. Cela dit, en quoi consistent les différences fondamentales que l'on pourrait identifier entre les énoncés de

²⁴³ L'on peut considérer, par exemple, que la fonction du système primaire « $A(n)$ » représente un certain stimulus visuel perceptible, alors que les fonctions propositionnelles, ou termes, du système secondaire « $\alpha(n)$ » et « $\gamma(0, n^2)$ » représentent deux possibles causes physiques (par exemple, électromagnétiques) de ce même stimulus, dont on peut affirmer qu'elles agissent soit de manière conjointe, soit indépendamment, mais toujours de telle sorte que le stimulus que représente « $A(n)$ » ne sera pas perçu si aucune d'entre elles ne se réalise.

²⁴⁴ Il faut préciser, à ce sujet, que Ramsey (1929, 1931) considérait les variables de fonctions propositionnelles « α », « β », « γ », ... « de façon purement extensionnelle » (« *purely extensionally* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 271), en adoptant ainsi une conception, justement, « extensionnelle » des fonctions de valeurs de vérité telle que celle dont nous avons parlé dans la section que nous avons consacrée aux *Principia Mathematica*. Cela signifie également qu'il les concevait comme étant des variables dont les parcours de signification peuvent contenir n'importe quelles classes d'entités, pourvu qu'elles soient « co-extensionnelles ». Encore une fois, voir Psillos (1999) à ce sujet.

Ramsey (1929, 1931) et la méthode de Craig (1953, 1956) ? En quoi pourrait-on considérer ces deux méthodes d'élimination des termes théoriques comme étant des solutions effectives au problème pratique que soulève le dilemme du théoricien ? En quoi sont-ils liés à la question de la distinction entre les constituantes analytiques, d'un part, et les constituantes synthétiques, d'autre part, d'une théorie donnée ?

En ce qui concerne la méthode de Craig (1953, 1956), la réponse que cet auteur a apportée à la question de savoir comment on peut substituer, de manière effective, un système formel S^* , d'où l'on a éliminé toute expression théorique, à tel ou tel système S , qui représente une théorie donnée, consiste à appliquer à ce dernier le théorème arithmétique suivant :

Soit C la clôture d'un certain ensemble récursivement dénombrable [d'entiers naturels] B sous une relation donnée R [*'the closure of a recursively enumerable set...under some relation'*] [(c'est-à-dire le plus petit ensemble d'entiers naturels dont les membres satisfont la relation R et qui contient B)]. Supposons qu'il existe une relation récursive primitive [*'a primitive recursive relation'*] Q [(c'est-à-dire une relation que l'on peut définir au moyen d'une fonction récursive primitive)], qui soit une sous-relation symétrique [*'a symmetric subrelation'*] de R ²⁴⁵ telle que, pour tout $m \in B$, $Q(m, n)$ soit vrai pour un nombre infini d'entiers naturels n . Alors il existe un ensemble récursif primitif [(c'est-à-dire un ensemble dont la fonction caractéristique est une fonction récursive primitive)] [d'entiers naturels] A tel que C soit la clôture de A sous R (Craig 1953, p. 30)²⁴⁶.

Afin d'appliquer ce théorème à un système formel tel que S , il suffit de choisir comme relation R la « relation de déductibilité en S » (« *relation of deductibility in S* »), que l'on peut reformuler, grâce au système de codage de Gödel (1931), en tant que relation entre entiers naturels. Plus précisément, l'on peut définir la relation R comme étant telle que $R(n, m)$ soit vrai si et seulement si « m est le nombre de Gödel [*'the Gödel number'*] d'une formule de S , ou d'une suite de formules, à partir de laquelle l'on peut déduire, à l'aide des axiomes de S [*'together with the axioms of S '*], une formule

²⁴⁵ C'est-à-dire une relation telle que si $Q(m, n)$, alors $Q(n, m)$ et $R(m, n)$ (Craig 1953, p. 30).

²⁴⁶ Considérons, par exemple, l'ensemble $A = \{n \in \mathbb{N} | (\exists p \in B)(p \leq n \wedge Q(f(p), n))\}$, où f est, justement, une fonction récursive primitive qui permet d'énumérer les éléments de B et Q est une sous-relation symétrique d'une relation R donnée. Comme l'explique Craig (1953) lui-même, « pour tout $m \in B$, il existe un $n \in A$ tel que $Q(m, n)$ et, par conséquent, $Q(n, m)$; il en découle que la clôture de A sous [la sous-relation] Q , et donc sa clôture sous [la relation] R , contient l'ensemble B . Inversement, comme Q est une sous-relation de R , A est contenu dans C ». En outre, l'on peut également en conclure, à partir de Gödel (1931), qu' A est un ensemble récursif primitif (Craig 1953, p. 30). Il en découle, par conséquent, que l'ensemble A vérifie le théorème en question.

ayant pour nombre de Gödel n , en appliquant des règles d'inférence de S [*'by applications of rules of inference of S '*] » (Craig 1953, p. 30). Par conséquent, soit B « n'importe quel ensemble récursivement énumérable...de formules de S » (« *any recursively enumerable set...of formulas of S* ») et soit C « la clôture, sous la relation de déductibilité en S , de B » (« *the closure under deduction in S of B* »), c'est-à-dire la clôture déductive de B en S , et donc l'ensemble des énoncés vrais de S qui sont des conséquences logiques (des théorèmes) de B . D'après le théorème que nous avons présenté plus haut, l'on peut en déduire qu'il existe « un ensemble récursif primitif A de formules de S » (« *a primitive recursive set A of formulas of S* ») qui soit tel que la clôture déductive du système formel que l'on peut construire en ajoutant A à S , « en tant qu'ensemble d'axiomes » (« *as axiom set* »), est égale à C . L'on peut donc en conclure que l'ensemble C est « axiomatisable de manière récursive primitive en S » (« *primitive recursively axiomatizable in S* ») (Craig 1953, p. 31). Il en découle que, si l'on dispose d'un critère permettant de distinguer de manière effective (c'est-à-dire au moyen de règles finies et bien déterminées), parmi toutes les expressions qui figurent dans la théorie T en question, celles que l'on peut considérer comme étant auxiliaires de celle que l'on peut considérer comme étant non auxiliaires, il est possible de se servir de ce même théorème pour construire un système formel S^* qui soit déductivement équivalent à S , mais qui ne contienne que des expressions non auxiliaires. Pour ce faire, il suffit de prendre pour ensemble B le système S lui-même et pour ensemble C l'ensemble des théorèmes de S qui ne contiennent que des termes auxiliaires. Ce faisant, l'on peut utiliser le théorème en question pour construire deux ensembles récursifs primitifs de formules qui appartiennent, respectivement, à S et à sa logique, pour ainsi dire, « sous-jacente » L , mais qui contiennent, elles aussi, uniquement des expressions non auxiliaires. C'est précisément en réunissant de telles formules, afin qu'elles puissent servir d'axiomes, que l'on peut construire un système formel S^* , fondé sur une logique L^* , dont les théorèmes sont précisément tous et seulement les théorèmes de S qui ne contiennent que des expressions non auxiliaires. Plus généralement, si l'on interprète les expressions non auxiliaires comme étant des expressions du vocabulaire de base, V_B , et les expressions auxiliaires comme étant des expressions qui contiennent également des termes théoriques du langage formel en question, le théorème de Craig (1953, 1956) permet d'identifier une méthode constructive dont on peut se servir, moyennant des présupposés peu contraignants, pour remplacer une certaine théorie interprétée T' par un système d'axiomes, T_B' , qui n'est rien d'autre que la classe des théorèmes de T' qui ne contiennent que des termes de V_B , c'est-à-dire qui n'est rien d'autre que la totalité des énoncés observationnels que l'on peut déduire de T' . Comme la clôture déductive du système que constituent ces nouveaux axiomes est, par conséquent, égale à la clôture déductive du système que constituent les postulats de T' , nous pouvons en conclure que les premiers sont fonctionnellement équivalents aux seconds, tout au moins du point de vue de la fonction de

systématisation déductive (Hempel 1958, 1965). Mais est-ce que cela signifie qu'il faudrait considérer la méthode de Craig (1953, 1956) comme étant une solution au problème pratique que soulève le dilemme du théoricien, c'est-à-dire, justement, au problème d'identifier une méthode qui permette de construire des systèmes axiomatiques qui soient dépourvus de termes proprement théoriques, si l'on considère ces derniers comme étant des expressions auxiliaires ?

Comme l'observait Hempel (1958, 1965) lui-même, appliquer la méthode de construction d'un système axiomatique que comporte le théorème de Craig (1953, 1956) à une théorie interprétée T' consiste, essentiellement, à remplacer les postulats dont se constitue la théorie en question par l'ensemble des énoncés observationnels que l'on peut en déduire. Ce faisant, l'on finit, néanmoins, par attribuer à ces derniers le statut de « vérités logiques », si bien que, pour n'importe quel couple d'énoncés observationnels « O_1 » et « O_2 » que l'on peut déduire de T' , l'on a, par définition, $c^*(O_1, O_2) = c^*(O_2, O_1) = 1$ ²⁴⁷. Plus généralement, pour toute conséquence empirique de la théorie en question que l'on peut utiliser comme donnée empirique, « $e \wedge j$ », afin de calculer le degré de confirmation d'une autre conséquence empirique, que l'on peut prendre pour hypothèse, « h' », c'est-à-dire afin de calculer l'instance qualifiée de confirmation du postulat qui est associé à une telle hypothèse, l'on obtient $c^*(h', e \wedge j) = 1$. Il en découle que la théorie interprétée ainsi reformulée, T_B' , est fonctionnellement équivalente à T' en ce qui concerne la fonction de systématisation déductive, mais non pas en ce qui concerne la fonction de systématisation inductive, car, plus généralement, elle ne permet d'effectuer aucune inférence inductive qui mette en relation les différentes conséquences empiriques de la théorie en question. C'est pourquoi Hempel (1958, 1965) en concluait que la méthode de Craig (1953, 1956) nous montre que l'on peut considérer le dilemme du théoricien comme étant valide seulement si l'on part du présupposé que la seule fonction des théories scientifiques consisterait à « établir des connexions déductives entre des énoncés observationnels » (« *establish deductive connections among observation sentences* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 222). Mais si l'on considère, en revanche, qu'une théorie scientifique devrait également être à même d'établir des connexions inductives entre les phénomènes qu'elle est censée systématiser, ainsi que de faire preuve d'« économie systématique » (« *systematic economy* ») et de « fertilité heuristique » (« *heuristic fertility* »), alors la conclusion que l'on peut tirer de la méthode de Craig (1953, 1956) est que le dilemme du théoricien « semble reposer sur une fausse prémisse » (« *seems to rest on a false premise* »), et donc qu'il est nécessaire de considérer les termes théoriques comme

²⁴⁷ Comme le remarquait explicitement Carnap (1945a), $c^*(h, e) = c^*(e, h) = 1$ si et seulement si l'énoncé « h » « L-implique » l'énoncé « e », et inversement, c'est-à-dire si et seulement si les deux énoncés en question sont logiquement équivalents, ce qui est précisément le cas si on les considère comme étant, tous les deux, des vérités logiques.

étant indispensables (Hempel 1958 ; 1965, p. 222)²⁴⁸. Nous pouvons donc en conclure que l'on ne peut pas considérer que le théorème de Craig (1953, 1956) constitue une méthode effective pour construire des systèmes axiomatiques qui soient équivalents à telle ou telle théorie interprétée T' , tout en étant dépourvus de termes théoriques. C'est précisément pour une telle raison que Hempel (1958, 1965) prenait également en considération une autre méthode d'élimination des termes théoriques d'une théorie donnée, c'est-à-dire, comme nous l'avons anticipé plus haut, la construction d'énoncés de Ramsey (1929, 1931). Mais en quoi pourrait-on considérer que cette seconde procédure serait préférable à la méthode de Craig (1953, 1956) ? Comment pourrait-on en envisager une application concrète ?

Pour répondre à ces questions, nous pouvons prendre en considération une autre des théories modèle que présente Hempel (1958, 1965) lui-même, toujours dans son article sur le dilemme du théoricien, c'est-à-dire ce que l'on pourrait appeler une « théorie du phosphore blanc » (« *white phosphorus* »). Plus précisément, cette théorie consiste en un système d'énoncés qui se composent de termes relevant de deux vocabulaires distincts : premièrement, un vocabulaire théorique, V_T , qui contient le prédicat « P », censé représenter la propriété « être du phosphore blanc », et le prédicat « I », censé représenter la propriété « avoir un point d'auto-inflammation [*ignition point*] égal à 30°C » ; deuxièmement, un vocabulaire de base, V_B , qui contient le prédicat « O », censé représenter la propriété « sentir l'oignon [*garlic-like odor*] », le prédicat « T », censé représenter la propriété « être soluble dans la térébenthine [*soluble in turpentine*] », le prédicat « V », censé représenter la propriété « être soluble dans l'huile végétale [*soluble in vegetable oil*] », le prédicat « E », censé représenter la propriété « être soluble dans l'éther diéthylique [*soluble in ether*] », le prédicat « B », censé représenter la propriété « causer des brûlures de la peau [*skin burns*] » et le prédicat « F », censé représenter la propriété « prendre feu spontanément à 30°C » (Hempel 1958 ; 1965, p. 214-215). En ce qui concerne le système de postulats T' dont se constitue la théorie en tant que telle, Hempel (1958, 1965) énumère un seul postulat théorique, c'est-à-dire le postulat « $(x)(Px \supset Ix)$ », cinq postulats interprétatifs qui constituent autant de conditions d'application conjointement nécessaires, mais individuellement indépendantes – dans le sens où il s'agit de conditions qui peuvent se manifester indépendamment les unes des autres dans un certain nombre de cas, même si, dans le cas où l'on a affaire à des substances chimiques qui sont effectivement du phosphore blanc, elles se

²⁴⁸ Comme le remarque Pierre Jacob (1980a), la méthode de Craig (1953, 1956) repose sur une hypothèse qui est « saugrenue parce qu'elle nie que l'élaboration d'une théorie soit destinée à comprendre les entités inobservables grâce auxquelles nous espérons expliquer les phénomènes observables. Elle suppose donc que la démarche scientifique ne doit rien au désir d'«expliquer le visible par l'invisible» (selon le mot de Jean Perrin) ; que l'invisible est intrinsèquement dénué d'intérêt scientifique » (Jacob 1980a, p. 149-150).

manifestent toujours conjointement –, du prédicat théorique « P », ainsi qu'un postulat interprétatif qui permet de définir les conditions d'application de l'autre prédicat théorique, « I » :

$$(x)(Px \supset Ox)$$

$$(x)(Px \supset Tx)$$

$$(x)(Px \supset Vx)$$

$$(x)(Px \supset Ex)$$

$$(x)(Px \supset Bx)$$

$$(x)(Ix \supset Fx)$$

(Hempel 1958 ; 1965, p. 214-215). Mais en quoi consiste donc l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l'on peut associer à une telle théorie ? Comme l'expliquait Hempel (1958, 1965) lui-même, l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) par le biais duquel on peut reformaliser cette théorie interprétée, afin d'en éliminer les prédicats théoriques « P » et « I », n'est rien d'autre que l'énoncé que l'on peut constituer en joignant les uns aux autres les différents postulats (théoriques ou interprétatifs) que nous venons de formuler, en remplaçant les prédicats « P » et « I » par les signes de prédicats non interprétés « φ » et « ψ », ainsi qu'en quantifiant existentiellement sur ces derniers :

$$(\exists\varphi)(\exists\psi)(x) [(\varphi x \supset (Ox \wedge Tx \wedge Vx \wedge Ex \wedge Bx)) \wedge (\psi x \supset Fx) \wedge (\varphi x \supset \psi x)]$$

(Hempel 1958 ; 1965, p. 216). Autrement dit, il s'agit d'un énoncé qui permet d'éliminer des expressions théoriques en ceci qu'il affirme l'existence de propriétés qui seraient, à priori, indéterminées, mais dont on pourrait, tout de même, se servir pour mettre en relation un certain nombre de propriétés observationnelles, tout en maintenant le même contenu informationnel que nous fournissent les termes que l'on vient de remplacer. Il en découle que, de même que le système axiomatique que l'on peut construire par le biais de la méthode de Craig (1953, 1956), l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) n'est pas logiquement équivalent à la théorie interprétée T' à laquelle il est associé²⁴⁹, mais il est tout de même fonctionnellement équivalent à cette dernière, du moins en ce qui

²⁴⁹ En effet, comme le remarquait toujours Hempel (1958, 1965), l'on peut écrire que « $(x)[(Px \supset (Ox \wedge Tx \wedge Vx \wedge Ex \wedge Bx)) \wedge (Ix \supset Fx) \wedge (Px \supset Ix)] \supset (\exists\varphi)(\exists\psi)(x) [(\varphi x \supset (Ox \wedge Tx \wedge Vx \wedge Ex \wedge Bx)) \wedge (\psi x \supset Fx) \wedge (\varphi x \supset \psi x)]$ », mais non pas l'inverse. En effet, s'il est vrai que « $(x)(Px \supset (\exists\varphi)(\varphi x))$ », cela n'est pas nécessairement le cas pour l'énoncé « $(x)((\exists\varphi)(\varphi x) \supset Px)$ » du moment où la variable prédicative φ peut prendre d'autres valeurs que « P ». Autrement dit, du point de vue de la formalisation de l'inférence déductive, l'instanciation existentielle n'est pas une règle d'inférence valide.

concerne la fonction de systématisation déductive, car il « implique exactement les mêmes énoncés de V_B qu'implique T' » (« *imply exactly the same V_B -sentences as does T'* »), c'est-à-dire qu'il « établit exactement les mêmes transitions déductives entre énoncés de V_B que permet d'établir T' » (« *establishes exactly the same deductive transitions among V_B -sentences as does T'* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 216). De plus, contrairement à la méthode de Craig (1953, 1956), la construction d'énoncés de Ramsey (1929, 1931) n'oblige pas à transformer la classe des conséquences empiriques de la théorie que l'on veut reformuler en un système d'axiomes. C'est précisément pour une telle raison que nous pouvons considérer l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) qui est associé à telle ou telle théorie comme étant fonctionnellement équivalent à cette dernière non seulement en ce qui concerne la fonction de systématisation déductive, mais également quant à celle de systématisation inductive. Cela dit, pourrions-nous donc en conclure que les énoncés de Ramsey (1929, 1931) permettent d'apporter une solution effective au problème pratique que soulève le dilemme du théoricien ?

La réponse que nous pouvons apporter à une telle question est d'autant plus importante qu'elle nous permet, encore une fois, de mettre au jour la différence de fond qui existe entre deux visions alternatives de la conception classique des théories scientifiques, à savoir une vision, pour ainsi dire, « hempelienne » et une vision, pour ainsi dire, « carnapienne ». Plus précisément, le lien entre la question de l'effectivité des énoncés de Ramsey (1929, 1931) en tant que procédure d'élimination des expressions du langage théorique que l'on peut utiliser pour reconstruire telle ou telle théorie particulière et la question de la distinction entre la vision hempelienne de la conception classique et celle qu'en a développée Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) consiste en ce qui suit : afin de répondre à la première question, il est nécessaire de donner une certaine interprétation du statut ontologique et épistémologique des termes théoriques tels qu'ils apparaissent dans les énoncés de Ramsey (1929, 1931), c'est-à-dire en tant que variables de degré supérieur au premier, qui finit par avoir des répercussions importantes sur les réponses que l'on peut apporter à l'autre question. Plus précisément, l'on serait tenté d'interpréter un terme théorique « à la Ramsey (1929, 1931) », c'est-à-dire un terme qui relève du système secondaire d'un langage-théorie donné, tel que « $\alpha(0,3)$ » comme étant un énoncé qui porte sur des individus de l'univers du discours du système primaire, puisqu'il s'agit de l'une des valeurs particulières que l'on peut attribuer à la fonction propositionnelle « $\alpha(x, y)$ ». Cependant, une telle expression n'a pas le même sens que l'on pourrait attribuer à un énoncé à part entière, puisque son caractère logique dépend, encore une fois, de son caractère épistémologique. Autrement dit, les termes du système secondaire d'un langage-théorie de Ramsey (1929, 1931) ne sont pas déduits des formules qui en constituent le système primaire. Bien au contraire, on les ajoute, au fur et à mesure, à un stock de formules préexistantes, à l'unique condition qu'ils ne soient logiquement incompatibles (c'est-à-dire en contradiction) avec

aucun des éléments qui sont déjà contenus dans ce même stock et qu'ils tombent sous la portée existentielle des variables que l'on a déjà quantifiées. Le but d'une telle extension consiste, en effet, à « trouver une loi à partir des cas observés pour ensuite déterminer les cas non observés à l'aide de cette loi » (« *from the observed instances to find a law and then to fill in the unobserved ones according to that law* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 272), et non pas à construire un réseau de compatibilités ou d'incompatibilités logiques qui limitent « *a priori* », et de manière totalement arbitraire, la clôture déductive du système secondaire en question. Comme l'écrivait Ramsey (1929, 1931) lui-même,

ce n'est pas qu'on ajoute $\alpha(0,3)$ à notre stock du moment qu'on pense qu'on peut le faire en toute vérité [*'whenever we think we could truthfully do so'*], c'est-à-dire du moment qu'on suppose que $(\exists\alpha, \beta, \gamma): stock.\alpha(0,3)$ est vrai ; $(\exists\alpha, \beta, \gamma): stock.\bar{\alpha}(0,3)$ pourrait aussi être vrai. C'est qu'on pense à ce qu'on pourrait bien ajouter ou espérer ajouter à notre stock, et qu'on considère que $\alpha(0,3)$ est sûrement plus approprié que $\bar{\alpha}(0,3)$, comme ajout à notre théorie [*' $\alpha(0,3)$ would be certain to suit any further additions better than $\bar{\alpha}(0,3)$ '*] (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 271-272).

C'est ainsi que, d'un point de vue épistémologique, Ramsey (1929, 1931) considérait que les termes théoriques « α », « β », « γ », ... seraient les équivalents de ce que Craig (1953, 1956) appelait, comme nous l'avons vu plus haut, des « expressions auxiliaires », en ceci que leur fonction consisterait moins à dénoter des objets, des propriétés ou des relations donnés qu'à organiser des termes qui relèvent du système primaire par le biais des lois et des conséquences que l'on peut en déduire. De plus, c'est précisément parce qu'il leur attribuait une telle fonction épistémologique que, d'un point de vue logique, il les concevait comme étant, du moins partiellement, analogues à ce que Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) appelaient des « symboles incomplets », c'est-à-dire des symboles dont la signification dépend d'un certain contexte, et notamment, dans le cas des termes de Ramsey (1929, 1931), du cadre logique que constitue le stock de formules préexistantes auquel on souhaite ajouter tel ou tel terme. Il en découle que, si on les considère en tant que tels, les termes théoriques dont parlait Ramsey (1929, 1931) ne dénotent, justement, pas de véritables entités, mais des « quasi-choses » auxquelles il est possible d'attribuer le même statut ontologique dont jouissent les classes que décrivent, encore une fois, Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) dans les *Principia Mathematica*. Cela dit, est-ce que le fait d'envisager de tels termes comme s'il s'agissait de variables existentiellement quantifiées ne finirait-il pas par entraîner une modification du statut ontologique que l'on peut attribuer à ces derniers ?

La réponse que Hempel (1958, 1965) apporte à une telle question, dans son analyse des énoncés de Ramsey (1929, 1931), est résolument positive. Comme il transforme les termes théoriques qui figurent dans telle ou telle théorie interprétée, T' , en variables existentiellement quantifiées, l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l'on peut associer à cette dernière nous permet d'éliminer les termes en question « dans la lettre » (« *in letter* »), c'est-à-dire, justement, de les remplacer par des symboles de variables non interprétés, mais non pas « dans l'esprit » (« *in spirit* »). En effet, poursuivait Hempel (1958, 1965), un tel énoncé

affirme tout de même l'existence de certaines entités qui sont du même type que les entités dont l'existence est postulée par T' [*'asserts the existence of certain entities of the kind postulated by T''*], sans qu'elle puisse assurer, pas plus que ne peut le faire T' , que de telles entités soient observables ou du moins entièrement caractérisables en termes d'entités observables [*'observables or at least fully characterizable in terms of observables'*] (Hempel 1958 ; 1965, p. 216).

C'est précisément pour une telle raison qu'il pouvait en conclure que « les énoncés de Ramsey [(1929, 1931)] ne nous proposent aucune manière de se passer des concepts théoriques qui soit satisfaisante » (« *Ramsey-sentences provide no satisfactory way of avoiding theoretical concepts* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 216). En outre, afin d'étayer une telle conclusion, Hempel (1958, 1965) faisait explicitement référence au concept d'« engagement ontologique » (« *ontological commitment* ») que Quine (1953) avait précédemment introduit dans le but de répondre à la question de savoir en quoi il serait possible de distinguer les « formes de discours » (« *forms of discourse* ») qui présupposent explicitement l'existence de certaines entités, quelle qu'en soit la nature, des formes de discours qui ne postulent pas l'existence de ces mêmes entités (Quine 1953, p. 102). D'après Quine (1953), il faudrait considérer que les formes de discours, et notamment les théories, qui relèvent du premier type se démarquent de celles de l'autre type précisément en ceci qu'elles seraient fondées sur tel ou tel ensemble d'engagements ontologiques. C'est pourquoi il a formulé un « critère d'engagement ontologique » (« *criterion of ontological commitment* »), qui affirme qu'« une théorie donnée présuppose l'existence d'entités de telle ou telle sorte si et seulement s'il est nécessaire de compter certaines d'entre elles parmi les valeurs de variables qui rendent vrais les énoncés qui figurent dans la théorie en question » (« *entities of a given sort are assumed by a theory if and only if some of them must be counted among the variables in order that the statements in the theory be true* ») (Quine 1953, p. 103). Mais qu'est-ce qui nous autoriserait à affirmer que telle ou telle valeur doit nécessairement faire partie du parcours de vérité de tel ou tel énoncé ? La réponse que Quine (1953) a apportée à cette autre question consiste à avancer que ce qui nous autorise à émettre un tel jugement

n'est pas la nature de telle ou telle variable libre ou de tel ou tel énoncé, mais la présence, ou l'absence, de quantificateurs existentiels ou universels dans la structure logique de l'énoncé en question. Lorsque nous affirmons, en effet, que « $(x \text{ est un nombre premier} \wedge x > 1000000)$ », nous ne nous engageons aucunement à accepter l'existence d'un nombre premier qui soit en même temps un nombre qui est plus grand que 1000000 – voire pas même à accepter l'existence d'un nombre premier et d'un nombre qui soit plus grand que 1000000 – car il ne s'agit pas d'un énoncé, mais d'une fonction propositionnelle qui dénote une classe d'énoncés, si bien que nous ne devons pas nécessairement présupposer que la classe en question ne soit pas vide, afin de pouvoir attribuer une signification à une telle expression. Bien au contraire, affirmer que « $(\exists x)(x \text{ est un nombre premier} \wedge x > 1000000)$ » (Quine 1953, p. 103), signifie, précisément, affirmer qu'il existe quelque chose, et notamment au moins une chose, qui possède en même temps la propriété d'être un nombre premier et la propriété d'être plus grand que 1000000. Il en découle que, si l'on accepte une telle définition du concept d'engagement ontologique, il faut considérer que le fait de quantifier existentiellement sur une variable donnée comporte une « réification » (« *reification* ») (Quine 1953) de la variable en question, c'est-à-dire l'attribution d'une portée ontologique.

En conséquence, c'est à partir d'une telle considération que nous pouvons comprendre les raisons qui ont conduit Hempel (1958, 1965) à en conclure que, loin d'éliminer complètement les termes théoriques des théories auxquelles ils sont associés, les énoncés de Ramsey (1929, 1931) comportent une interprétation réaliste de ces derniers. C'est ainsi qu'il opposait une telle interprétation à une conception « nominaliste » (« *nominalist* ») des théories scientifiques « comme étant non pas des énoncés doués de signification, mais des outils complexes » (« *not as significant statements, but as intricate devices* ») qui permettent, comme nous l'avons vu plus haut, d'effectuer des transitions inductives-déductives entre des énoncés qui sont « exprimés dans les termes d'un vocabulaire compris à l'avance » (« *expressed in terms of an antecedently understood vocabulary* »), V_B (Hempel 1958 ; 1965, p. 221). Plus précisément, Hempel (1958, 1965) suggérait que ces deux conceptions de la nature des théories scientifiques ne seraient que deux variantes possibles de ce que nous avons appelé une « vision holiste » de la conception classique en tant que cadre conceptuel, d'après laquelle toute théorie consisterait dans un système d'énoncés synthétiques associé à un système d'interprétation, T' , dont la fonction serait, encore une fois, de systématiser inductivement et déductivement un certain domaine de connaissances empiriques, exprimées dans un vocabulaire de base V_B . Dans une telle perspective, la différence essentielle entre la vision holiste, pour ainsi dire, « standard » que défendait Hempel (1958, 1965) lui-même, d'une part, et sa variante réaliste ou sa variante nominaliste, d'autre part, consisterait en ceci que ces dernières permettent de ne pas

envisager les expressions dont se constitue le système T' comme étant des énoncés au sens propre du terme, ce qui implique, en retour, une différente appréciation de la portée ontologique que l'on peut attribuer à de telles expressions. Du point de vue de la conception réaliste que semblent impliquer les énoncés de Ramsey (1929, 1931), le système T' se composerait, pour ainsi dire, de « déclarations de bonne foi » (« *bona fide statements* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 220), c'est-à-dire de jugements potentiels, puisque leur sujet grammatical consiste en une variable et non pas dans une constante qui pourrait servir de nom désignant un sujet proprement dit, c'est-à-dire empiriquement identifiable²⁵⁰. Cela dit, de tels jugements auraient tout de même une portée ontologique réelle, qui leur reviendrait en tant qu'expressions linguistiques individuelles, car la variable qui y tient lieu de sujet est une variable (existentiellement) quantifiée, et donc réifiée. Du point de vue d'une conception nominaliste, en revanche, les expressions dont se compose T' constitueraient non pas des énoncés, mais de simples outils inférentiels dont la fonction consisterait à rendre possible, pour ainsi dire, la « manipulation » d'énoncés observationnels. En tant qu'outils, de telles expressions seraient, par conséquent, dépourvues de toute portée ontologique. D'après la version standard de la vision holiste de la conception classique, au contraire, les expressions que contient une théorie (partiellement) interprétée, T' , seraient, comme nous venons de le rappeler, des énoncés synthétiques à part entière, mais dépourvus de toute portée ontologique individuelle. Plus précisément, d'après une telle version de la vision holiste, ce seraient les théories elles-mêmes, en tant que systèmes d'énoncés, qui possèderaient une portée ontologique. Comme l'expliquait Hempel (1958, 1965) lui-même, en effet, de son point de vue, affirmer qu'il existe des particules élémentaires qui appartiennent à tel ou tel type, dont le comportement est déterminé par telle ou telle loi physique et qui sont observables sous telle ou telle condition « équivaut à affirmer que la théorie physique (interprétée) des particules élémentaires est vraie » (« *is tantamount to asserting the truth of the (interpreted) physical theory of elementary particles* »), et notamment qu'elle est vraie précisément en tant que système d'énoncés partiellement interprétés (Hempel 1958 ; 1965, p. 220)²⁵¹.

²⁵⁰ Comme l'écrivait Ramsey (1929, 1931) lui-même, « tout ajout à la théorie, que ce soit sous la forme de nouveaux axiomes ou d'énoncés particuliers tels que $\alpha(0,3)$, doit être fait sous la portée existentielle des axiomes originaux α , β , γ [*to be made within the scope of the original α , β , γ*]. À strictement parler, ils ne sont pas en soi de véritables propositions, pas plus que les différentes phrases qui commencent par « Il était une fois » dans les histoires pour enfants ne possèdent de signification entière et ne sont en elles-mêmes de véritables propositions [*They are not, therefore, strictly propositions by themselves just as the different sentences in a story beginning 'Once upon a time' have not complete meanings and so are not propositions by themselves*] » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 271).

²⁵¹ Hempel (1958, 1965) ajoutait également que c'est précisément une telle conception de « l'existence d'entités hypothétiques dotées de caractéristiques et de relations mutuelles bien déterminées » (« *the existence of hypothetical entities with specified characteristics and interrelations* ») – c'est-à-dire en tant que portée ontologique de théories

Il en découle que la lecture que donnait Hempel (1958, 1965) de la construction d'énoncés de Ramsey (1929, 1931), à la fois en tant que procédure d'élimination des termes théoriques qui sont contenus dans une théorie donnée et en tant que méthode de reconstruction formelle de la théorie en question, diffère considérablement de celle qu'en donnait Carnap (1963). Ce dernier s'accordait avec Hempel (1958, 1965) pour affirmer qu'un énoncé de Ramsey (1929, 1931) fait toujours référence à « des entités théoriques par l'intermédiaire de variables abstraites » (« *theoretical entities by the use of abstract variables* ») (Carnap 1963, p. 963) – c'est-à-dire par l'intermédiaire de variables dont le degré est supérieur au premier et dont les parcours de signification contiennent, par conséquent, non pas des individus, mais des classes, des classes de classes, et ainsi de suite. Il maintenait, néanmoins, que les entités en question ne seraient « pas des objets physiques non observables [*'not unobservable physical objects'*], comme les atomes, les électrons, etc., mais plutôt ...des entités de nature purement logico-mathématique [*'but rather purely logicomathematical entities'*], tels que des nombres naturels, des classes de nombres naturels, des classes de classes, etc. » (Carnap 1963, p. 963), quoique, encore une fois, « physiquement caractérisées »²⁵². Autrement dit, Carnap (1963) interprétait la portée ontologique des énoncés de Ramsey (1929, 1931) comme étant en tout point identique à la portée des termes théoriques tels qu'il les envisageait lui-même, dans le cadre de sa propre vision de la conception classique des théories scientifiques (Carnap 1956, 1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000)²⁵³.

scientifiques qui sont conçues comme systèmes d'énoncés partiellement interprétés – qui permet de concevoir cette dernière comme faisant l'objet non pas de présupposés métaphysiques, mais d'hypothèses empiriques « que l'on peut examiner inductivement, dans le même sens où l'on peut examiner la vérité même [d'une théorie donnée], notamment par la mise à l'épreuve empirique de ses conséquences- V_B » (« *can be examined inductively in the same sense in which the truth of the theory itself can be examined, namely, by empirical tests of its V_B -consequences* ») (Hempel 1958 ; 1965, p. 220).

²⁵² Bien que l'on ne puisse pas établir une correspondance parfaite entre les deux débats en question, nous pouvons remarquer que les différences entre les interprétations que donnaient, respectivement, Hempel (1958, 1965) et Carnap (1963) de la portée ontologique des énoncés de Ramsey (1929, 1931) rappellent celles que nous avons constatées, dans le chapitre précédent, entre une conception « réaliste » et une conception « nominaliste-constructiviste » des classes telles que les envisagent Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913) dans les *Principia Mathematica*, y compris en ce qui concerne le problème de la nature de la quantification universelle ou existentielle.

²⁵³ Il faut remarquer que, de cette manière, Carnap (1963) ne faisait rien d'autre qu'étendre aux termes du système secondaire du langage-théorie de Ramsey (1929, 1931) la caractérisation que ce dernier avait lui-même donnée des énoncés du système primaire de ce même langage : « Si on représentait tous les termes par des nombres, les propositions du système primaire prendraient toutes la forme d'assertions sur les valeurs uniques que prennent certaines fonctions numériques [*'the propositions of the primary system would all take the form of assertions about the values taken by certain one-valued numerical functions'*]. De telles fonctions ne seraient pas des fonctions mathématiques au sens ordinaire du mot [*'not be mathematical functions in the ordinary sense'*], car ce serait toujours une question de fait, et

Mais en quoi consisterait, par conséquent, la caractérisation physique des entités auxquelles font référence les termes théoriques qui figurent dans une théorie donnée, en tant qu'entités logico-mathématiques, que nous fournit un énoncé de Ramsey (1929, 1931) ? Pour répondre à une telle question, nous pouvons prendre en considération, encore une fois, une théorie modèle, et plus précisément celle qu'analyse Carnap (1966) lui-même dans les chapitres de *Les Fondements philosophiques de la physique* qu'il a consacrés, justement, au concept même d'énoncé de Ramsey (1929, 1931) et à celui de « critère d'analyticité » pour les langages théoriques. Cette théorie consiste en un système d'énoncés **TC** dont les postulats-T comprennent « des lois de la théorie cinétique des gaz » (« *some laws from the kinetic theory of gases* »), qui décrivent les propriétés microscopiques des gaz en général – et notamment les mouvements des molécules qui les composent, les vitesses de ces dernières, leurs chocs, etc. –, des lois microscopiques qui sont spécifiques à l'hydrogène, en tant que gaz, ainsi que « des lois de la théorie des gaz à l'échelle macroscopique [*macro-gas-theory laws*'] », concernant la température, la pression et la masse totale d'une (macro-)quantité de gaz » (Carnap 1966 ; 1973, p. 243). Les postulats-C de ce même système consistent, en revanche, en des énoncés qui fournissent une interprétation empirique aux termes théoriques « température » et « pression », qui apparaissent également dans les postulats-T que nous venons d'énoncer, en fonction de quelques termes du vocabulaire observationnel (ou vocabulaire de base) de la théorie en question. Il s'agit, plus précisément, de « règles opératoires pour mesurer la température et la pression » (« *operational rules for the measurement of temperature and pressure* ») qui prennent la forme, par exemple, d'« une description de la manière dont on construit un thermomètre et un manomètre [*a description of the construction of a thermometer and a manometer*'] », ainsi que des règles pour déterminer la température et la pression à partir des nombres lus sur l'échelle graduée des instruments de mesure [*from the numbers read on the scales of instruments*'] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 243).

En suivant l'analyse de la structure syntaxique du langage théorique et du langage observationnel d'une théorie donnée que faisait Carnap (1956a, 1958) lui-même, nous pouvons donc représenter cette théorie modèle, quoiqu'en forme schématique, de la manière suivante :

- (**T**) ... *P*(*Mol*) ... \wedge *P*(*Hymol*) ... \wedge *P*(*Temp*) ... \wedge *P*(*Press*) ... \wedge *P*(*Mass*) ... \wedge *P*(*Vel*) ...
- (**C**) ... *C*(*Temp*) ... \wedge *C*(*O*₁) ... \wedge *C*(*O*₂) ... \wedge *C*(*O*₃) ... \wedge *C*(*Press*) \wedge *C*(*O*₄) ... \wedge *C*(*O*_{*m*}) ...
- (**TC**) (... *P*(*Mol*) ... \wedge *P*(*Hymol*) ... \wedge *P*(*Temp*) ... \wedge *P*(*Press*) ... \wedge *P*(*Mass*) ... \wedge *P*(*Vel*) ...) \wedge
 (... *C*(*Temp*) ... \wedge *C*(*O*₁) ... \wedge *C*(*O*₂) ... \wedge *C*(*O*₃) ... \wedge *C*(*Press*) \wedge *C*(*O*₄) ... \wedge *C*(*O*_{*m*}) ...)

non pas une question de mathématiques [*a matter of fact, not a matter of mathematics*'], que de déterminer leurs valeurs » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 257).

où « *Mol* », « *Hymol* », « *Temp* », « *Press* », « *Mass* » et « *Vel* » (Carnap 1966 ; 1973, p. 243) sont des constantes du langage théorique du système **TC** qui dénotent, respectivement, la classe des valeurs numériques que l'on peut caractériser physiquement comme étant des quantités de moles de tel ou tel gaz (sauf l'hydrogène), la classe des valeurs numériques que l'on peut caractériser physiquement comme étant des quantités de moles d'hydrogène, ainsi que les extensions des relations (c'est-à-dire les classes de *n*-uplets ordonnés de valeurs numériques qui appartiennent aux deux classes précédentes) que l'on peut caractériser physiquement comme étant la température, la pression, la masse et la vitesse microscopique des molécules d'une certaine (macro-)quantité de gaz donnée. Quant aux constantes du langage observationnel de **TC**, elles consistent dans la séquence de termes « *O*₁ », « *O*₂ », « *O*₃ », « *O*₄ », ... « *O*_{*m*} » (Carnap 1966 ; 1973, p. 243), c'est-à-dire dans une séquence de *m* termes qui dénotent directement des entités, des propriétés ou des relations qui sont observables (ou du moins plus facilement observables que les entités que désignent les termes théoriques), et dont on peut supposer, en conséquence, qu'elles sont, pour ainsi dire, « physiquement existantes » – et donc non pas, tout simplement, physiquement caractérisées – si bien qu'elles constituent le domaine empirique que la théorie en question est censée représenter et expliquer. Tout comme dans le cas de la théorie modèle du phosphore blanc que présente Hempel (1958, 1965) dans son article sur le dilemme du théoricien, l'énoncé de Ramsey (1929, 1931), **^RTC**, qui correspond à cette autre théorie consiste en un énoncé de la forme suivante :

$$(\mathbf{^R TC}) \quad (\exists C_1)(\exists C_2)(\exists R_1)(\exists R_2)(\exists R_3)(\exists R_4)[(\dots P(C_1) \dots \wedge P(C_2) \dots \wedge P(R_1) \dots \wedge P(R_2) \dots \wedge P(R_3) \dots \wedge P(R_4) \dots) \wedge (\dots C(R_1) \dots \wedge C(O_1) \dots \wedge C(O_2) \dots \wedge C(O_3) \dots \wedge C(R_2) \wedge C(O_4) \dots \wedge C(O_m) \dots)]$$

(Carnap 1966 ; 1973, p. 244) où « *C*₁ » et « *C*₂ » sont les deux variables de classes, non interprétées, que l'on peut utiliser pour remplacer les constantes théoriques « *Mol* » et « *Hymol* », alors que « *R*₁ », « *R*₂ », « *R*₃ » et « *R*₄ » sont les variables de relations, encore une fois non interprétées, dont on peut se servir pour remplacer les constantes théoriques « *Temp* », « *Press* », « *Mass* » et « *Vel* ». Il en découle que l'énoncé **^RTC** affirme, tout simplement, qu'il existe au moins six entités logico-mathématiques, à savoir au moins deux classes et quatre relations, dont on peut affirmer qu'elles sont physiquement caractérisées en ceci qu'elles « sont reliées d'une manière spécifiée [*'connected with one another in a specified way'*] (à savoir comme il est spécifié dans la première partie, soit la partie *T*, de la formule) » et que « les deux relations *R*₁ et *R*₂ sont reliées avec les *m* entités observables [*'connected with the m observational entities'*], *O*₁ ..., *O*_{*m*}, d'une manière

également spécifiée (à savoir comme il est spécifié dans la seconde partie, soit la partie *C*, de la formule) » (Carnap 1966 ; 1973, p. 244). En d'autres termes, les propriétés et les relations logiques qui caractérisent ces entités logico-mathématiques sont déterminées, d'une part, par la structure inhérente au domaine de l'expérience empirique qui fait l'objet de la théorie en question, telle qu'elle est représentée par les postulats-C, ainsi que, d'autre part, par la structure conceptuelle qui est propre à cette même théorie, telle qu'elle est représentée par les postulats-T. Par conséquent, c'est précisément en cela que consiste la caractérisation physique des entités logico-mathématiques auxquelles font référence les termes théoriques qui figurent dans une théorie donnée que nous fournit l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l'on peut associer à cette dernière. De plus, c'est précisément à partir d'une telle caractérisation que Carnap (1963, 1966) pouvait tirer deux conclusions majeures au sujet des rapports qui existent entre une certaine théorie formalisée *TC* et son énoncé de Ramsey (1929, 1931), *^RTC*. Mais en quoi consistent, par conséquent, de telles conclusions ? De quelle manière nous permettraient-elles de mieux comprendre en quoi consiste la vision de la conception classique des théories scientifiques, aussi bien en tant que cadre métathéorique qu'en tant que cadre conceptuel, que Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par développer, dans le but de sauver la distinction entre énoncés synthétiques et énoncés analytiques, par opposition à la vision holiste que nous avons attribuée à Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) ?

3.3.2 Les énoncés de Ramsey et les énoncés de Carnap : une vision dichotomique de la conception classique des théories scientifiques

La première conclusion que Carnap (1958, 1963, 1966) pouvait tirer au sujet des rapports qui existent entre une certaine théorie formalisée *TC* et son énoncé de Ramsey (1929, 1931), *^RTC*, a trait à la substituabilité des énoncés d'une telle nature aux théories auxquelles ils sont associés, et donc à leur effectivité en tant que procédures permettant de remplacer les termes théoriques qui figurent dans ces mêmes théories par des termes observationnels. Carnap (1958, 1963, 1966) en concluait, en effet, que l'énoncé *^RTC* est un « énoncé factuel » (« *factual sentence* »), puisqu'il se limite à affirmer que « les événements observables qui se produisent dans le monde physique [*the observable events in the world*'] sont tels qu'il existe des nombres, des classes de nombres, etc., qui sont corrélés aux événements en question d'une manière prédéfinie [*which are correlated with the events in a prescribed way*'] et qui entretiennent les uns avec les autres des relations données » (Carnap 1963, p. 963). De plus, il avançait également que, en tant qu'énoncé factuel, *^RTC* « possède le même *pouvoir d'explication et de prédiction* » (« *has precisely the same explanatory and predictive power* ») que *TC* (Carnap 1966 ; 1973, p. 244), puisque la clôture déductive du premier coïncide avec celle du

second, du moins en ce qui concerne les énoncés que l'on peut déduire des postulats TC dans le langage observationnel étendu qui leur est associé²⁵⁴. En termes techniques, cela signifie que ${}^R TC$ possède le même « contenu observationnel » (« *observational content* »), ou « contenu-O » (« *O-content* ») que TC , si bien que « ${}^R TC$ est O-équivalent [*'O-equivalent'*] [ou observationnellement équivalent] [*'observationally equivalent'*] à TC », et que « pour tout énoncé S [exprimé dans le même langage théorique que TC] l'énoncé de Ramsey ${}^R(S \wedge TC)$ est O-équivalent à S relativement à [*'relative to'*] TC » (Carnap 1963, p. 962)²⁵⁵. C'est ainsi que Carnap (1963) pouvait en déduire que, quoique l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R TC$ ne soit pas strictement équivalent, et donc pas strictement substituable, à la théorie TC , car leur équivalence se limite à la seule fonction de systématisation déductive, il constitue tout de même un *explicatum* de la « portée empirique » (« *experiential import* ») de cette dernière (Carnap 1963, p. 362). En d'autres termes, il s'agit d'un énoncé qui permet d'expliciter le contenu empirique de la théorie en question, en tant que représentation de la structure propre du domaine de l'expérience qui en fait l'objet. Quant à la seconde conclusion que Carnap (1958, 1963, 1966) tirait de la caractérisation physique des termes théoriques de la théorie TC que fournit l'énoncé ${}^R TC$, elle est étroitement liée à la première et a trait à la manière dont on peut interpréter la conception classique des théories scientifiques. En effet, si l'on peut considérer l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) d'une théorie donnée comme étant un *explicatum* du

²⁵⁴ Ce faisant, Carnap (1963) prolongeait, encore une fois, une réflexion qu'avait déjà engagée Ramsey (1929, 1931) lui-même, lorsqu'il avait écrit que, d'un point de vue strictement logico-formel, il n'y a aucune différence entre l'usage que l'on peut faire de tel ou tel terme du système secondaire d'un certain langage-théorie et celui que l'on pourrait faire de toute variable existentiellement quantifiée par laquelle on aurait, éventuellement, remplacé ce même terme, pourvu qu'on fasse attention à la portée du quantificateur existentiel que l'on aurait introduit par ce même biais : « On peut très bien faire des raisonnements sur [*'reason about'*] les personnages d'une histoire tout comme s'ils avaient vraiment existé [*'just as well as if they were really identified'*], pourvu qu'on ne prenne pas une partie de notre propos comme portant sur une histoire, et une partie comme portant sur une autre [*'provided we don't take part of what we say as about one story, part about another'*]. On ne peut donc dire que le fait que les 'propositions' du système secondaire soient des propositions incomplètes affecte nos *débats* [*'our disputes'*] mais pas notre *raisonnement* [*'but not our reasoning'*] » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 272). Pour une critique des arguments de Ramsey (1929, 1931) et de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) à ce sujet, voir, par exemple, Raatikainen (2011a).

²⁵⁵ Plus précisément, Carnap (1963) définissait le concept de contenu observationnel, et tous les concepts que l'on peut en déduire, de la manière suivante : 1) « le *contenu observationnel* ou contenu-O de l'énoncé [du langage L] $S \stackrel{\text{def}}{=} \text{la classe de tous les énoncés du langage observationnel étendu } L'_O \text{ qui ne sont pas } L\text{-vrais } [non-L\text{-true}] \text{ et qui sont impliqués par } S \text{ } [implied by S]$ » ; 2) « le contenu-O de l'énoncé S relativement à la théorie $TC \stackrel{\text{def}}{=} \text{le contenu-O de l'énoncé } (S \wedge TC)$ » ; 3) « l'énoncé S' est *O-équivalent* (ou observationnellement équivalent) à l'énoncé $S \stackrel{\text{def}}{=} S'$ est un énoncé du langage L'_O et S' a le même contenu-O que S » ; 4) « l'énoncé S' est *O-équivalent à l'énoncé } S \text{ relativement à la théorie } TC \stackrel{\text{def}}{=} S' est un énoncé du langage L'_O et S' a le même contenu-O que S relativement à la théorie TC » (Carnap 1963, p. 962).*

contenu empirique que possède cette dernière, il semble naturel d'en déduire que l'on pourrait s'en servir pour définir également un *explicatum* du contenu conceptuel de la théorie en question, en tant que construction syntaxique qui servirait de représentation pour l'architecture de concepts qui structure la théorie en question, ainsi que, pour ainsi dire, de « moule logique » pour ledit contenu empirique. Faire cela signifierait, cependant, séparer les composantes analytiques d'une telle théorie de ses composantes synthétiques, et donc, de manière plus générale, définir le concept même d'analyticité par rapport aux expressions du langage théorique, L_T , correspondant. Si tel était le cas, les deux *explicata* ainsi formulés pourraient donc nous permettre de développer une vision de la conception classique des théories scientifiques qui ne soit pas holiste, comme celle que défendait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), mais qui repose, au contraire, sur une dichotomie entre les composantes analytiques et les composantes synthétiques d'une théorie donnée, telle que la vision que proposait, justement, Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) lui-même. En conséquence, de quelle manière pourrait-on identifier de tels *explicata* ?

Afin de répondre à cette question, il est utile de se concentrer sur la communication que Carnap (Psillos & Carnap 2000) a présentée en 1959, lors d'une conférence organisée par l'*American Philosophical Association*, et qui a été successivement éditée, par Stathis Psillos, en 2000 (Psillos & Carnap 2000). Comme nous l'avons anticipé plus haut, cette communication porte précisément sur le rôle que jouent les concepts théoriques dans les sciences empiriques, tel qu'on peut le caractériser à l'aune de la distinction entre les composantes analytiques d'une théorie donnée et ses composantes synthétiques. Plus précisément, par « composantes analytiques », c'est-à-dire A-vraies, d'une théorie (partiellement) interprétée $TC(t_1, \dots, t_n; o_1, \dots, o_m)$, qui contient n termes théoriques, « t », et qui les relie à m termes observationnels, « o », Carnap (Psillos & Carnap 2000) entendait tous les énoncés qui sont des conséquences logiques de la conjonction de deux classes de postulats : d'une part, la classe des postulats de signification, ou postulats-A, pour les termes du langage observationnel, A_O , que nous avons analysés plus haut (Carnap 1952, 1966) ; d'autre part, la classe des postulats de signification pour les termes du langage théorique, A_T . Par « composantes synthétiques », c'est-à-dire « physiquement vraies » ou « P-vraies » (« *P-true* »), de la théorie en question, Carnap (1963 ; Psillos & Carnap 2000) entendait, en revanche, tous les énoncés qui sont des conséquences logiques de la conjonction de A_O , de A_T , ainsi que d'une troisième classe de postulats, P , c'est-à-dire la classe des postulats qui expriment le contenu physique, ou empirique, des axiomes TC , et que l'on peut appeler, par conséquent, des « postulats-P » (« *P-postulates* ») (Carnap 1963 ; Psillos & Carnap 2000,

p. 163)²⁵⁶. Mais en quoi consistent, plus précisément, ces trois classes de postulats ? Comme nous l'avons vu plus haut, la classe A_O se compose d'énoncés universels qui ne contiennent que des termes du langage d'observation, L_O , de la théorie en question et qui servent à définir les relations, de nature purement logique, que certains d'entre eux entretiennent les uns avec les autres, de manière à réduire le degré d'imprécision qu'entraîne l'usage de ce même langage²⁵⁷. Un exemple en est le postulat qui sert à préciser que le terme observationnel « plus chaud » (« *warmer* ») permet d'établir une relation entre deux autres expressions qui est de nature asymétrique : « Pour tout x et tout y , si x est plus chaud que y , alors y n'est pas plus chaud que x » (« *For any x and any y , if x is warmer than y , then y is not warmer than x* ») (Carnap 1966 ; 1973, p. 255). L'asymétrie qui caractérise une telle relation ne constitue pas, en effet, le contenu d'une information factuelle, puisqu'elle constitue l'une des conditions de possibilité de l'application du terme « plus chaud » aux informations que nous livre l'expérience empirique, dans le but de formuler, justement, des contenus factuels. Autrement dit, elle constitue une composante essentielle de la signification du terme observationnel en question.

Néanmoins, comme nous l'avons déjà évoqué, s'il est relativement facile de fournir une formulation générale de ce en quoi pourrait consister un postulat-A dans le cas du langage observationnel, il n'en est pas de même pour les postulats-A qui s'appliquent aux termes d'un langage théorique donné, L_T . La raison en est que dans le cas d'un langage théorique, contrairement à ce que l'on peut affirmer de tel ou tel langage observationnel, il existe également une troisième source d'imprécision et d'incertitude concernant l'usage de telle ou telle expression, outre l'existence de composantes analytiques dans la signification de cette dernière et l'incapacité de tel ou tel locuteur de saisir une telle signification, c'est-à-dire le fait que l'interprétation empirique des termes théoriques est toujours partielle et indirecte, pour les raisons que nous avons discutées dans les sections précédentes. Il s'ensuit qu'afin de comprendre la signification des termes théoriques qui figurent dans une théorie partiellement interprétée TC , tout en faisant abstraction des limites que comportent les capacités de compréhension de tel ou tel locuteur, il est nécessaire, au préalable, de définir deux types de relations que ces mêmes termes peuvent entretenir les uns avec les autres, à savoir les relations logiques que l'on peut définir au moyen de postulats d'une classe telle que la

²⁵⁶ En notation formelle, pour tout énoncé « S » d'un langage théorique, L , donné, « S est A-vrai en $L \stackrel{\text{def}}{\vdash} A_O \wedge A_T \supset S$ », alors que « S est P-vrai en $L \stackrel{\text{def}}{\vdash} A_O \wedge A_T \wedge P \supset S$ » (Psillos & Carnap 2000, p. 164).

²⁵⁷ Comme l'expliquait Carnap (1966) lui-même, une fois que l'on a introduit des postulats de signification dans le contexte d'un cadre linguistique donné, « toute imprécision subsistante [*Any haziness that remains*]...devra être attribuée non pas au fait que nous n'aurions pas clairement saisi la dichotomie entre analytique et synthétique, mais au fait que nous comprenons de façon nébuleuse la signification des termes descriptifs du langage considéré [*'because of haziness in understanding the meanings of the descriptive words of the language'*] » (Carnap 1966 ; 1973, p. 254-255).

classe A_T , d'une part, et les relations de nature factuelle, ou physique, qui résultent de leur interprétation partielle en fonction de quelques termes observationnels, et que l'on peut définir, en conséquence, par le biais d'une classe de postulats comme la classe P . Autrement dit, afin de comprendre la signification des termes théoriques qui figurent dans une théorie TC , il est nécessaire de distinguer deux composantes de cette dernière, comme le remarquait Ramsey (1929, 1931) lui-même. D'une part, il est nécessaire d'identifier ce qu'affirme la théorie en question, « sa signification ou son contenu » (« *its meaning or content* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 272), c'est-à-dire, justement, les relations factuelles entre phénomènes qui en constituent la signification empirique. D'autre part, il est également nécessaire d'identifier « son formalisme » (« *its symbolic form* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 272), qui n'est, cependant, rien d'autre que l'expression linguistique de son contenu conceptuel, c'est-à-dire du « surplus de signification » (Hempel 1950a) que l'on peut attribuer aux termes théoriques qui y figurent en vertu des relations logiques qu'ils entretiennent les uns avec les autres et qu'il serait impossible de réduire, tout simplement, à son contenu empirique. Plus précisément, la première composante n'est rien d'autre que la clôture déductive des postulats de la classe P et constitue, par conséquent, un possible *explicatum* du contenu empirique de la théorie en question. L'autre composante consiste, en revanche, dans la clôture déductive des postulats de la classe A_T , que l'on peut considérer, en conséquence, comme étant une possible candidate au rôle d'*explicatum* du contenu conceptuel de cette même théorie, ou du moins de son expression linguistique. Cela dit, en quoi pourrait-on se servir des énoncés de Ramsey (1929, 1931) pour mieux expliciter en quoi consistent ces deux *explicata* ? En quoi consiste la vision, pour ainsi dire, « dichotomique » de la conception classique des théories scientifiques que l'on pourrait inférer d'une telle explicitation, ainsi que par opposition à la vision holiste que prônait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) ?

La réponse que Carnap (Psillos & Carnap 2000) lui-même apporte, dans sa communication datant de 1959, à la question de savoir de quelle manière l'on pourrait expliciter en quoi consistent l'*explicatum* du contenu empirique d'une théorie donnée, ainsi que l'*explicatum* de son contenu conceptuel préconise, justement, d'utiliser l'énoncé de Ramsey (1929, 1931), ${}^R TC: (\exists u_1) \dots (\exists u_n) TC(u_1, \dots, u_n; o_1, \dots, o_m)$, que l'on peut associer à une théorie (partiellement) interprétée TC afin d'en identifier les composantes synthétiques, par opposition à ses composantes analytiques. Plus précisément, Carnap (Psillos & Carnap 2000) proposait de s'en servir non pas pour remplacer TC , en éliminant, par ce même biais, les termes théoriques qui y figurent, mais pour exprimer aussi bien la conjonction des postulats de la classe P , dont on peut se servir pour définir le contenu empirique, ou synthétique, de la théorie en question, que celle des postulats de la classe A_T ,

dont on peut se servir pour en définir le contenu conceptuel, ou analytique. En d'autres termes, d'après Carnap (Psillos & Carnap 2000), pour toute théorie (partiellement) interprétée TC ,

$$P \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC$$

$$A_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC \supset TC$$

où le signe « \supset » représente ici le connecteur logique d'« implication matérielle » (« *material implication* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 164). Par conséquent, Carnap (Psillos & Carnap 2000) préconisait de se servir de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R TC$ précisément dans le but de départager le volet analytique de la conjonction de postulats (théoriques ou d'interprétation) TC , c'est-à-dire la conjonction des postulats de la classe A_T que l'on peut associer à la théorie en question, de son volet synthétique, c'est-à-dire la conjonction des postulats de la classe P correspondante. Afin de justifier un tel partage, il est tout de même nécessaire, comme le remarquait Carnap (Psillos & Carnap 2000) lui-même, de montrer que ce dernier remplit deux conditions fondamentales. Premièrement, il faut montrer que P et A_T ainsi définies, c'est-à-dire comme étant, respectivement, l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R TC$ et ce qu'on appelle communément l'« énoncé de Carnap » (« *Carnap sentence* ») (Raatikainen 2011b) ${}^R TC \supset TC$, « ne sont effectivement ni plus ni moins que la théorie originaire » (« *really are no more and no less than the old theory* »), c'est-à-dire TC , « si bien que [nous pouvons] les considérer comme étant une partition de la théorie originaire en plusieurs parties constituantes » (« *so that I can regard them as a splitting of the old theory into parts* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 164). Deuxièmement, il faut montrer que « la première [, c'est-à-dire $P \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC$,] est purement factuelle et que l'autre [, c'est-à-dire $A_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC \supset TC$,] constitue une pure et simple spécification de la signification [conceptuelle, et donc analytique, de la théorie en question] » (« *that the one really is merely factual and the other merely {a} specification of meaning* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 164).

En termes plus formels, cela signifie qu'il est nécessaire de montrer que

- (1) $\vdash TC \equiv (P \wedge A_T) [\stackrel{\text{def}}{=} ({}^R TC \wedge ({}^R TC \supset TC))]$
- (2) $P [\stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC]$ est O-équivalente à TC
- (3) $\vdash {}^R A_T [\stackrel{\text{def}}{=} R({}^R TC \supset TC)]$.

Montrer (1) signifie, en effet, montrer que « \mathbf{TC} est logiquement équivalente [*‘logically equivalent’*] à \mathbf{P} et $\mathbf{A_T}$ » (Psillos & Carnap 2000, p. 164), et donc que $(\mathbf{P} \wedge \mathbf{A_T})$, c’est-à-dire [$\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})$], remplit la première condition que nous avons énoncée plus haut. Pour démontrer cela, il suffit de recourir, encore une fois, à l’un des systèmes de dérivation formelle dont la fonction est de formaliser le concept même de déduction, comme, par exemple, le système de la déduction naturelle (Wagner 2014), ainsi qu’au fait que $(\mathbf{P} \wedge \mathbf{A_T}) \stackrel{\text{def}}{=} (\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC}))$. En conséquence, d’une part, l’on peut montrer que $\vdash_{DN} (\mathbf{P} \wedge \mathbf{A_T}) \supset \mathbf{TC}$, tout simplement en montrant que $\vdash_{DN} (\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})) \supset \mathbf{TC}$ ²⁵⁸, alors que, d’autre part, l’on peut également démontrer que $\vdash_{DN} \mathbf{TC} \supset (\mathbf{P} \wedge \mathbf{A_T})$, tout simplement en démontrant que $\vdash_{DN} \mathbf{TC} \supset (\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC}))$ ²⁵⁹. Montrer (2) signifie, en revanche, montrer à la fois que la classe de postulats \mathbf{P} , c’est-à-dire la classe que l’on peut réduire à l’énoncé de Ramsey (1929, 1931) \mathbf{RTC} , est de nature purement factuelle et qu’elle n’est ni plus, ni moins que le volet empirique, c’est-à-dire synthétique, de \mathbf{TC} . Comme nous l’avons vu dans la section précédente, la raison en est qu’« elle nous fournit les [mêmes] informations factuelles [*‘the factual information’*] [que nous donne \mathbf{TC}], en ce qui concerne les observations empiriques [*‘as far as observations are concerned’*], et elle ne nous fournit certainement aucune spécification de la signification [*‘it certainly does not give us any specification of the meaning’*] [analytique] des termes- \mathbf{T} , car ces derniers n’[y] figurent pas du tout » (Psillos & Carnap 2000, p. 164-165). Pour démontrer cela, il suffit d’observer que l’énoncé \mathbf{RTC} se limite à affirmer que

²⁵⁸ Pour montrer cela, il suffit d’utiliser les règles d’élimination de la conjonction ($\wedge E_1$ et $\wedge E_2$), ainsi que les règles d’élimination ($\rightarrow E$) et d’introduction ($\rightarrow I$) de l’implication (Wagner 2014, p. 222-225) :

$$\frac{\frac{\frac{\mathbf{RTC} / (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})}{\mathbf{RTC}} \wedge E_1}{\mathbf{TC}} \quad \frac{\frac{\mathbf{RTC} / (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})}{\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC}} \wedge E_2}{\mathbf{TC}} \wedge E}{\mathbf{TC} \supset (\mathbf{RTC} / (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})) \supset \mathbf{TC}} \rightarrow I$$

²⁵⁹ Pour montrer cela, il suffit d’utiliser la règle d’introduction de l’implication ($\rightarrow I$) et la règle d’introduction de la conjonction ($\wedge I$) (Wagner 2014, p. 222-225) :

$$\frac{\frac{[\mathbf{RTC}]}{\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC})} \wedge I \quad \frac{[\mathbf{TC}]}{\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC}} \rightarrow I}{\mathbf{TC} \supset (\mathbf{RTC} \wedge (\mathbf{RTC} \supset \mathbf{TC}))} \rightarrow I$$

il existe n objets mathématiques [*‘mathematische Gegenstände’*] qui satisfont les postulats \mathbf{TC} [*‘die Postulate \mathbf{TC} erfüllen’*], ou, plus précisément, qui entretiennent avec des processus observables les relations qui sont définies par \mathbf{C} [*‘zu beobachtbaren Vorgängen in den durch \mathbf{C} festgelegten Beziehungen stehen’*] et, les uns avec les autres, les relations qui sont indiquées en \mathbf{T} [*‘zu einander die in \mathbf{T} angegebenen Beziehungen haben’*] (Carnap 1958, p. 245),

si bien que, dans le langage observationnel de la théorie en question, tous les énoncés que l’on peut déduire de \mathbf{TC} sont également dérivables de ${}^R\mathbf{TC}$, et inversement. Montrer (3) signifie, en conclusion, montrer que l’énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l’on peut associer à \mathbf{A}_T , c’est-à-dire à la classe de postulats qui se réduit à l’énoncé (${}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}$), est analytique au sens de « L-vrai » (Wagner 2014, p. 236), et donc, *a fortiori*, également au sens d’« A-vrai ». Par conséquent, il est possible d’en inférer que la classe de postulats \mathbf{A}_T est elle-même analytique, puisque, comme l’on peut en conclure à partir de (2), l’énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R\mathbf{AT}$ est O-équivalent à \mathbf{A}_T , ce qui signifie précisément que le contenu factuel de cette dernière est, en fait, un contenu de nature purement conceptuelle. Pour démontrer cela, il suffit de remarquer que

$${}^R({}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}) \stackrel{\text{def}}{=} (\exists v_1) \dots (\exists v_n)((\exists u_1) \dots (\exists u_n)\mathbf{TC}(u_1, \dots, u_n; o_1, \dots, o_m) \supset \mathbf{TC}(v_1, \dots, v_n; o_1, \dots, o_m)),$$

d’où l’on peut en tirer deux conclusions majeures. Premièrement, l’on peut en conclure que ${}^R\mathbf{A}_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R({}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC})$ est un énoncé logiquement vrai, car la condition qui rend vrai l’antécédent, $(\exists u_1) \dots (\exists u_n)\mathbf{TC}(u_1, \dots, u_n; o_1, \dots, o_m)$, c’est-à-dire l’existence d’au moins un n -uplet de termes théoriques, quels qu’ils soient, qui satisfait les postulats \mathbf{TC} , est la même condition qui rend vrai, *ipso facto*, le conséquent, c’est-à-dire $\mathbf{TC}(v_1, \dots, v_n; o_1, \dots, o_m)$. Deuxièmement, l’on peut en conclure, en outre, que ${}^R\mathbf{A}_T$ n’est pas seulement un énoncé analytique, mais également un énoncé analytique « dans le langage observationnel » (« *in the observation language* ») étendu, c’est-à-dire dans une version du langage observationnel, associé à la théorie en question, qui contient, néanmoins, le formalisme logique nécessaire à formuler les énoncés de Ramsey (1929, 1931)²⁶⁰. Plus précisément, il s’agit d’un énoncé qui affirme non seulement qu’il existe « une quelque connexion [de nature

²⁶⁰ Par « langage observationnel », « au sens le plus étendu du terme » (« *in the wider sense* »), Carnap (Psillos & Carnap) entendait en effet un langage \mathbf{L}'_O qui contient, « comme termes descriptifs, seulement les termes observationnels simples » (« *as descriptive terms only the simple observation terms* »), mais qui contient également « une logique très riche » (« *a very rich logic* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 167).

purement analytique] reliant des termes entre eux, et notamment reliant les termes-T les uns aux autres et les termes-T aux termes-C » (« *some connection between the terms, namely the T-terms among themselves and the T-terms with the C-terms* »), mais également que la connexion en question est « de nature telle qu'elle nous permet de donner une interprétation partielle de ces mêmes termes » (« *of such a kind that it helps to give a partial interpretation for it* »), ce qui constitue, justement, la fonction d'un postulat de signification, ou plus précisément d'une conjonction de postulats de signification, pour un langage théorique partiellement interprété comme L_T (Psillos & Carnap 2000, p. 165).

C'est ainsi que, ayant démontré les propositions (1), (2) et (3), Carnap (Psillos & Carnap 2000) pouvait se servir de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931), ${}^R\mathbf{TC}$, ainsi que de l'énoncé de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), (${}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}$), que l'on peut associer à une théorie (partiellement interprétée) \mathbf{TC} pour établir une classification des énoncés qui sont formulables dans le langage formel pertinent. Plus précisément, comme on peut le constater en observant le diagramme à la figure (5), au niveau le plus général possible, il distinguait les énoncés vrais (« *true* ») des énoncés faux (« *false* ») et, au sein de chacune de ces deux macro-catégories, il identifiait trois groupes d'énoncés, à savoir, d'une part, les énoncés qui sont « L-vrais » (« *L-true* ») (c'est-à-dire, comme nous l'avons déjà vu, logiquement vrais, ou analytiques au sens strict du terme), « A-vrais » (« *A-true* ») (c'est-à-dire analytiques au sens large du terme) ou « P-vrais » (« *P-true* ») (c'est-à-dire factuellement vrais),

ainsi que, d'autre part, les énoncés qui sont « L-faux » (« *L-false* »), « A-faux » (« *A-false* ») ou « P-faux » (« *P-false* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 165). Dans une position intermédiaire entre ces deux catégories plus spécifiques, Carnap (Psillos & Carnap 2000) situait, par la suite, des énoncés que l'on peut considérer comme étant « indéterminés » (« *indeterminate* »), en ceci qu'il est impossible, justement, d'en déterminer la valeur de vérité par le biais de quelque principe général. Il s'agit, plus précisément, d'énoncés qui



Figure 5 : Taxonomie des différentes catégories d'énoncés que l'on peut établir sur la base du formalisme de la "Forme II" (Psillos & Carnap 2000, p. 166)

sont, comme nous l'avons évoqué plus haut, « L-indéterminés », car on ne saurait déterminer s'ils sont vrais ou s'ils sont faux en considérant uniquement leur forme logique et la signification des

termes logiques qui y figurent, d'énoncés qui sont « A-indéterminés » (« *A-indeterminate* »), car il est impossible de savoir s'ils sont vrais ou s'ils sont faux en considérant uniquement la signification des termes logiques et des termes descriptifs qui y figurent, ou d'énoncés qui sont « P-indéterminés » (« *P-indeterminate* »), c'est-à-dire « contingents » (« *contingent* »), puisque leur valeur de vérité ne dépend pas de quelques « lois fondamentales de la physique » (« *basic physical laws* »), mais de conditions empiriques qui sont, justement, de nature purement contingente (Psillos & Carnap 2000, p. 165). Il en découle que, en suivant une telle classification, l'on peut en conclure que les composantes analytiques d'une théorie donnée consistent dans les énoncés L-vrais ou A-vrais que l'on peut déduire des postulats A_T et des postulats A_O , alors que ses composantes synthétiques consistent dans les énoncés P-vrais qui sont des conséquences logiques de la conjonction des postulats A_T , des postulats A_O et des postulats P . Cela dit, Carnap (Psillos & Carnap 2000) préconisait d'utiliser les énoncés de Ramsey (1929, 1931) et les énoncés de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) également dans le but de départager deux formalismes alternatifs, c'est-à-dire deux manières alternatives de reconstruire formellement la structure et le contenu de telle ou telle théorie scientifique à l'instar de la conception classique. La première, que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) appelait « Forme I » (« *Form I* »), consiste à reconstruire une théorie donnée sous la forme de la conjonction de trois classes de postulats, à savoir la classe des postulats de signification pour les énoncés du langage observationnel en question, A_O , la classe des postulats-T, T , et la classe des postulats-C, C . La seconde, que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) appelait « Forme II » (« *Form II* »), consiste à reconstruire cette même théorie sous la forme de deux classes de postulats que l'on peut formuler au moyen du langage observationnel, mais logiquement étendu, correspondant, à savoir, encore une fois, A_O et la classe de postulats synthétiques, P , qui se réduit à l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R\mathbf{TC}$, ainsi que d'une classe de postulats où figurent également des termes théoriques, et qui n'est rien d'autre que la classe de postulats de signification, A_T , qui se réduit à l'énoncé de Carnap (1958, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) (${}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}$). Cela dit, en quoi pourrait-on en conclure que ces deux formalisations alternatives de la structure et du contenu d'une théorie donnée correspondent à autant d'interprétations possibles de la conception classique des théories scientifiques ?

Comme première chose, nous pouvons remarquer que le formalisme que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) appelait « Forme I » n'est rien d'autre qu'une représentation schématique de la composante (méta)syntaxique de la conception classique des théories scientifiques telle qu'on pourrait l'envisager au prisme d'une vision de ce même cadre métathéorique que nous avons qualifiée, plus haut, de « vision holiste », tout en attribuant la paternité, du moins principalement, à Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965). D'après une telle vision, quoiqu'il soit possible

d'identifier des composantes analytiques, au sens large du terme, au sein du langage observationnel que l'on peut associer à une théorie partiellement interprétée, **TC**, la structure et le contenu de cette dernière constitue, comme nous l'avons précédemment évoqué, un bloc unique d'énoncés synthétiques, dont la fonction est double : d'une part, elle consiste à fournir une interprétation empirique, toujours partielle, aux termes théoriques qui y figurent, en fonction de quelques termes observationnels ; d'autre part, elle consiste à rendre possible, par ce même biais, une systématisation inductive et déductive de la connaissance empirique que l'on peut exprimer dans le langage observationnel qui correspond à la théorie en question, par l'intermédiaire des théorèmes que l'on peut déduire, dans ce même langage observationnel, à partir des postulats-T et des postulats-C de **TC**. En conséquence, toujours selon une telle vision, ce serait la double fonction que remplit le système de postulats **TC** qui rendrait impossible toute distinction entre le surplus de signification que l'on peut attribuer aux termes théoriques et la manière dont ces derniers permettent de formuler des prédictions, des post-dictions ou des explications, c'est-à-dire, précisément, de fournir une systématisation théorique d'un certain domaine de connaissances empiriques, sur la base des relations qu'ils entretiennent les uns avec les autres, ainsi qu'avec un certain nombre de termes observationnels. Autrement dit, dans la vision holiste de la conception classique des théories scientifiques, d'une part, le surplus de signification que possèdent les concepts théoriques n'est pas « épistémiquement réductible » (« *epistemically reducible* ») à la « référence factuelle » (« *factual reference* ») des termes qui les représentent, c'est-à-dire aux relations logiques que les énoncés où figurent ces mêmes termes entretiennent avec des énoncés observationnels (Hempel 1950a, p. 171-172) ; d'autre part, il est tout de même inséparable du contenu factuel que la structure de la théorie en question permet de dégager à partir de son propre domaine d'application empirique. C'est précisément pour une telle raison que Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965) estimait, de même que Quine (1951, 1953), que toute tentative d'effectuer une distinction entre les composantes analytiques et les composantes synthétiques d'une théorie donnée serait vouée à l'échec. Les présupposés fondamentaux de cette vision holiste de la conception classique des théories scientifiques nous permettent, en outre, d'envisager cette dernière comme étant non seulement un cadre métathéorique, mais également un cadre conceptuel. La raison en est que la vision holiste de la conception classique comporte trois contraintes substantielles qui s'appliquent à la structure et au contenu propres aux théories qui sont reconstruites à son instar. Comme nous l'avons mentionné dans les sections précédentes, il s'agit de trois contraintes, qui sont, respectivement, de nature ontologique, de nature épistémologique et de nature cognitive. La première contrainte consiste en ceci que la vision holiste de la conception classique attribue des statuts ontologiques différents aux entités qui constituent l'univers du discours du langage théorique, **L_T**, d'une part, et à celles qui constituent l'univers du discours du langage

observationnel, L_O , d'autre part. Plus précisément, alors que les premières sont conçues comme étant des constructions syntaxiques auxquelles on peut attribuer une portée ontologique réelle, inexistante ou purement contextuelle – c'est-à-dire qui dépend de la portée ontologique de la théorie tout entière –, selon que l'on adopte une version réaliste, instrumentaliste ou « standard » de la vision holiste que prônait Hempel (1950b, 1951, 1954, 1958, 1965), les secondes sont conçues comme étant des entités observables, et donc physiquement existantes. La seconde contrainte consiste en ceci que la fonction de systématisation inductive et déductive que la conception classique attribue – par ailleurs, non seulement dans le cadre d'une vision holiste – aux théories scientifiques comporte un présupposé de symétrie inférentielle, c'est-à-dire le présupposé d'après lequel il n'existerait aucune différence de nature ontologique ou épistémique entre les prédictions, les post-dictions et les explications, pourvu qu'on les envisage comme étant des formes d'inférence qui permettent de mettre en relation des énoncés observationnels, par l'intermédiaire d'énoncés théoriques. La troisième contrainte consiste en ceci que, étant associée à une métathéorie sémantique de l'interprétation du langage théorique des sciences empiriques comme interprétation partielle et indirecte des termes et des énoncés qui en relèvent, la vision holiste de la conception classique permet de concevoir les concepts que représente ce même langage comme étant des concepts ouverts, c'est-à-dire comme étant des concepts qui ne sont pas entièrement définissables en termes purement logiques, par opposition aux concepts logico-mathématiques. Cela dit, en quoi consiste, en revanche, la vision de la conception classique des théories scientifiques, aussi bien comme cadre métathéorique que comme cadre conceptuel, que l'on peut associer à cet autre formalisme que Carnap (Psillos & Carnap 2000) appelait la « Forme II » ?

Comme nous venons de le voir, le formalisme de la « Forme II » se distingue de celui de la « Forme I » en ceci que le corps conceptuel d'une théorie donnée y est représenté non pas sous la forme d'une conjonction de postulats, TC , dont les composantes synthétiques sont inséparables de leurs composantes analytiques, mais sous la forme d'une conjonction de deux classes de postulats, dont l'une constitue le contenu conceptuel, et donc analytique, de la théorie en question, c'est-à-dire la classe A_T , alors que l'autre en constitue le contenu empirique, et donc synthétique, c'est-à-dire la classe P . Il en découle qu'un tel formalisme peut être considéré comme étant une représentation schématique du volet (méta)syntaxique de la conception classique des théories scientifiques tel qu'on pourrait l'envisager au prisme d'une vision, pour ainsi dire, « dichotomique » comme celle que prônait, justement, Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) dans le but de sauver la distinction entre énoncés scientifiques de nature analytique et énoncés scientifiques de nature synthétique que ce dernier regardait comme étant essentielle, pour les raisons que nous avons discutées plus haut. Plus précisément, une telle vision de la conception classique repose sur deux présupposés fondamentaux. Le premier de ces présupposés consiste, comme nous l'avons vu plus

haut, à affirmer que « $P \stackrel{\text{def}}{=} {}^R\mathbf{TC}$ », c'est-à-dire à affirmer que « l'énoncé de Ramsey [(1929, 1931)] d'une théorie donnée en représente le contenu 'factuel' de manière adéquate » (« *the Ramsey sentence of a theory adequately represents the theory's 'factual' content* ») (Demopoulos 2013c, p. 140). L'autre présupposé consiste, en revanche, à affirmer que « $A_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}$ », et donc à affirmer que le contenu conceptuel, c'est-à-dire analytique, d'une théorie donnée se résume à la relation logique particulière que l'on peut établir entre le contenu factuel ou empirique, c'est-à-dire synthétique, de cette dernière, tel que le représente son énoncé de Ramsey (1929, 1931), et sa structure logico-syntaxique, telle que la représente le système de postulats (théoriques ou interprétatifs) \mathbf{TC} . Plus précisément, la relation logique en question n'est rien d'autre qu'une relation d'implication matérielle, si bien que nous pouvons en déduire deux conséquences majeures, à savoir, d'une part, que la vérité de la conjonction de postulats \mathbf{TC} constitue une condition nécessaire, mais non suffisante, pour la vérité de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) de la théorie en question et, d'autre part, que la vérité du second constitue une condition suffisante, mais non nécessaire, pour la vérité du premier. Afin d'explicitier la signification de ces deux conséquences de la définition du contenu conceptuel, ou analytique, d'une théorie donnée que nous fournit l'énoncé de Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) correspondant, nous pouvons donc identifier, en nous inspirant de l'article pionnier d'Alfred Tarski (1935a, 1956) au sujet du concept de « vérité dans les langages formalisés », deux conditions de vérité qui s'appliquent à toute théorie scientifique, en tant que système de formules partiellement interprétées : premièrement, une condition d'« adéquation matérielle » (« *sachlich zutreffend* », « *material adequate* ») ; deuxièmement, une condition de « correction formelle » (« *formale Korrektheit* », « *formal correctness* »). La première condition consiste en ceci que, pour qu'on puisse la considérer comme étant matériellement (c'est-à-dire factuellement ou empiriquement) vraie, une théorie scientifique doit représenter de manière adéquate la structure inhérente au domaine de l'expérience qu'elle est censée systématiser, telle qu'on peut l'exprimer au moyen de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) qui est associé à la théorie en question. Autrement dit, nous pouvons poser comme principe le fait qu'une théorie donnée est matériellement vraie, et donc matériellement adéquate, si et seulement si son énoncé de Ramsey (1929, 1931) est vrai. L'autre condition consiste en ceci que, pour qu'on puisse la considérer comme étant formellement vraie, et donc formellement correcte, une théorie scientifique doit posséder une structure syntaxique, telle qu'elle est représentée par le système de postulats \mathbf{TC} , qui soit logiquement consistante, c'est-à-dire logiquement cohérente. En d'autres termes, nous pouvons stipuler qu'une théorie donnée est formellement vraie, et donc formellement correcte, si et seulement si la conjonction de ses postulats-T et de ses postulats-C constitue un énoncé vrai.

Il s'ensuit que, d'après la vision de la conception classique que l'on peut associer au formalisme que constitue la « Forme II » dont parlait Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000), le contenu empirique ou factuel, et donc synthétique, d'une théorie donné, lorsqu'elle est reconstruite sous la forme d'un système d'énoncés partiellement interprétés, consiste, tout simplement, dans sa condition d'adéquation matérielle, alors que son contenu conceptuel, et donc analytique, consiste en une relation d'implication où sa condition d'adéquation matérielle tient lieu d'antécédent, alors que sa condition de correction formelle tient lieu de conséquent. Nous pouvons donc en conclure que le contenu conceptuel, ou analytique, d'une théorie scientifique, tel qu'il est défini par l'énoncé de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) que l'on peut y associer, se limite à affirmer deux choses : premièrement, que la structure formelle de la théorie en question, en tant que construction syntaxique (c'est-à-dire en tant que totalité des relations logiques, aussi bien d'implication que de confirmation, qu'un énoncé donné entretient avec tous les autres énoncés de la théorie en question), est sous-déterminée par son contenu factuel. Il se peut, en effet, qu'une telle théorie soit formellement correcte, c'est-à-dire logiquement consistante, tout en n'étant pas empiriquement adéquate ; deuxièmement, que la structure formelle qui caractérise la théorie en question est nécessairement impliquée par la structure inhérente au domaine empirique qu'elle est censée systématiser, telle que la représente l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l'on peut y associer, ou, ce qui revient au même, que la vérité formelle, et donc la consistance, de la théorie en tant que construction syntaxique est nécessairement impliquée par l'adéquation matérielle de son contenu empirique, tel qu'il est exprimé par ce même énoncé de Ramsey (1929, 1931). La raison en est que le postulat « $A_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC \supset TC$ » pose, précisément, que

s'il existe des entités (parcourues par les quantificateurs de l'énoncé de Ramsey [(1929, 1931)]) qui se trouvent reliées ensemble par toutes les relations exprimées dans les postulats théoriques de la théorie ['if entities exist... that are of a kind bound together by all the relations expressed in the theoretical postulates of the theory'] et qui entretiennent avec les entités observationnelles toutes les relations spécifiées par les postulats de correspondance de la théorie ['are related to observational entities by all the relations specified by the correspondance postulates of the theory'], alors la théorie elle-même [, toujours en tant que construction syntaxique,] est vraie ['the theory itself is true'] (Carnap 1966 ; 1973, p. 262).

Autrement dit, il affirme que si l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) ${}^R TC$ constitue, en tant qu'énoncé synthétique, une représentation adéquate du monde, alors il est possible d'attribuer aux termes

théoriques de la théorie TC une certaine signification analytique, et notamment une signification qui soit telle qu'elle leur permette de satisfaire (c'est-à-dire de rendre vraie) la théorie en question, en tant que système de formules, et donc en tant que construction syntaxique. En conséquence, c'est précisément en ceci que l'on peut s'en servir pour formuler les deux conditions de vérité que nous venons d'énoncer, ainsi que toutes les conséquences que l'on peut tirer de ces dernières, que la vision de la conception classique que l'on peut associer à la « Forme II » dont parlait Carnap (Psillos & Carnap 2000) permet d'obtenir deux résultats. Premièrement, elle permet d'identifier la composante analytique d'une théorie donnée, sa composante synthétique, ainsi que la manière dont ces deux composantes s'articulent l'une à l'autre. Deuxièmement, elle permet d'assigner aux termes théoriques qui figurent dans une théorie donnée un surplus de signification qui soit, à la fois, épistémiquement irréductible aux conséquences empiriques de la théorie en question et distinct de son contenu empirique ou factuel. C'est en cela qu'il est possible de qualifier une telle vision de la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre métathéorique, de « dichotomique ». Néanmoins, en quoi cette même vision de la conception classique nous permettrait-elle de l'envisager comme constituant, également, un cadre conceptuel ?

3.3.3 L'« opérateur epsilon » et la réduction des termes théoriques : la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel « structuraliste »

Afin de répondre à une telle question, nous pouvons remarquer que les deux présupposés fondamentaux de la vision dichotomique de la conception classique des théories scientifiques que nous venons d'énoncer, à savoir le présupposé que « $P \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC$ » et le présupposé que « $A_T \stackrel{\text{def}}{=} {}^R TC \supset TC$ », ne sont, à leur tour, rien d'autre que des conséquences logiques d'un présupposé plus fondamental, que William Demopoulos (2013c) a qualifié de « thèse structuraliste » (« *structuralist thesis* ») (Demopoulos 2013c, p. 140). Plus précisément, il s'agit du présupposé qu'« il est possible de saisir intégralement le versant théorique de ce qu'expriment nos théories par le biais d'énoncés qui ne dépendent que de la catégorie logique des concepts qui les constituent » (« *The theoretical component of what our theories express is wholly captured by statements which depend only on the logical category of their constituent concepts* ») (Demopoulos 2013c, p. 140). Cette thèse se limite, par conséquent, à traduire dans le formalisme de Ramsey (1929, 1931) et Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) ce qu'on pourrait appeler, en empruntant les mots de Bas C. van Fraassen (2008), une « conception structuraliste de la science » (« *structuralism about science* ») (van Fraassen 2008, p. 190), en la transformant, par ce même biais, en une « [méta]théorie des théories [scientifiques] » (« *theory of theories* ») (Demopoulos 2013c, p. 153). Mais en quoi consiste une telle

conception ? Toujours en suivant van Fraassen (2008), ainsi que Psillos (1999) et Demopoulos (2013a), nous pouvons définir le structuralisme, en tant que manière d'envisager la science et les théories scientifiques, comme une vision qui affirme que notre connaissance d'objets physiques tels que des chaises, des étoiles, etc. n'est jamais directe, mais toujours le résultat de la mise en relation d'un certain nombre de données sensorielles, ou « *sense-data* », que nous percevons, de manière immédiate, au travers de nos organes de sens. Plus précisément, ces mêmes données élémentaires de l'expérience sont mises en relation, les unes avec les autres, en conformité avec des propriétés structurelles que nous pouvons construire logiquement comme étant des propriétés que l'on peut attribuer aux objets eux-mêmes, si bien que ce sont précisément de telles propriétés structurelles, et non pas les objets eux-mêmes, qui constituent, pour ainsi dire, la « matière » de nos connaissances²⁶¹. Dans une telle perspective, pour citer encore une fois van Fraassen (2008), « tout ce que nous connaissons, ce sont les structures » (« *all we know is structure* ») (van Fraassen 2008, p. 238). Il en découle que la thèse dont parle Demopoulos (2013c) est structuraliste dans la mesure où l'on peut interpréter les types logiques des concepts dont se composent les énoncés qui permettent de saisir les contenus des théories scientifiques comme constituant des structures. Mais en quoi consistent, par conséquent, les types logiques de ces mêmes concepts et quels sont les énoncés auxquels fait référence Demopoulos (2013c) ? De tels énoncés ne sont rien d'autre que les énoncés de Ramsey (1929, 1931), car, comme nous venons de le rappeler, la vision dichotomique de la conception classique que prônait Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) repose précisément sur le présupposé que l'on puisse se servir de ces derniers pour définir aussi bien les contenus empiriques des théories scientifiques que leurs contenus conceptuels. De plus, la construction d'énoncés de Ramsey (1929, 1931) consiste à remplacer les termes théoriques qui figurent dans les postulats d'une théorie donnée par des variables d'ordre supérieur au premier (c'est-à-dire des variables de classes, des variables de relations, des variables de classes de classes, des variables de relations de relations, etc.). Il s'agit, par conséquent, de variables qui désignent des « catégories » (« *categories* ») de nature logique, conçues comme étant des « espèces ou genres » (« *kinds or*

²⁶¹ Par conséquent, c'est précisément une version embryonnaire d'une telle conception des fondements de la connaissance scientifique que présentait Bertrand Russell (1915) lui-même, lorsqu'il écrivait que « le monde peut être conçu comme composé d'une multitude d'unités arrangées dans une certaine configuration [*a multitude of entities arranged in a certain pattern*']. J'appellerai 'particuliers' [*particulars*'] les entités ainsi arrangées. L'arrangement ou la configuration résultent de relations entre particuliers. Les classes ou les suites de particuliers [*classes or series of particulars*'], rassemblés en raison de certaines propriétés qui permettent aisément de parler d'elles comme de totalités [*wholes*'], représentent ce que j'appelle constructions logiques ou fictions symboliques [*logical constructions or symbolic fictions*'] » (Russell 1915 ; 2007, p. 128).

genera ») (Thomasson 2018) d'entités logico-mathématiques que l'on peut ranger dans un ordre hiérarchique qui va, justement, des espèces ou genres inférieurs aux espèces ou genres supérieurs. C'est précisément dans un tel sens que les concepts que représentent les termes théoriques qui sont éventuellement remplacés par des variables d'ordres supérieurs au premier, lorsque la théorie en question finit par être « ramsey-fiée » (« *Ramsey-ized* ») (Psillos & Carnap 2000), appartiennent à des catégories logiques, et plus précisément à des catégories qui prennent la forme de types simples (Chwistek 1921, 1922 ; Ramsey 1926, 1931 ; Gödel 1931 ; Tarski 1935a ; Church 1940 ; Carnap 1956a, 1958). Cela dit, en quoi peut-on affirmer que les énoncés de Ramsey (1929, 1931) dépendent uniquement de la catégorie des concepts qui les constituent ? Et en quoi cette propriété impliquerait-elle les deux présupposés fondamentaux de ce que nous avons qualifié de « vision dichotomique » de la conception classique des théories scientifiques ?

Afin de comprendre en quoi les énoncés de Ramsey (1929, 1931) ne dépendent que de la catégorie des concepts qui les constituent, il suffit d'analyser la manière dont Ramsey (1929, 1931) lui-même définissait le concept d'équivalence entre deux théories données, c'est-à-dire comme étant une relation qui tient aux contenus empiriques des théories en question et non pas à leurs formalismes respectifs. Plus précisément, il affirmait que « deux théories sont dites *équivalentes* [*'equivalent'*] si elles ont le même contenu [empirique, ou contenu-O] [*'the same content'*], *contradictaires* [*'contradictory'*] si elles ont des contenus contradictoires [*'contradictory contents'*] » (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 272), puisque, si deux théories *A* et *B* partagent le même contenu empirique, mais diffèrent par leur formalisme, il est toujours possible de définir les termes de l'une sur la base des termes de l'autre, moyennant des fonctions qui établissent une relation de ressemblance entre les termes en question, si bien que « si on n'impose aucune restriction sur la complexité des définitions... la relation de ressemblance se ramènera à celle d'équivalence » (« *if we allow definitions of any degree of complexity... the relation becomes simply equivalence* ») (Ramsey 1929, 1931 ; 2003, p. 273). Cela signifie, tout simplement, que, étant données deux théories, *A* et *B*, qui possèdent deux systèmes secondaires, c'est-à-dire deux vocabulaires V_T , distincts, mais qui partagent le même système primaire, c'est-à-dire le même vocabulaire V_O , l'on peut affirmer que ces dernières sont contradictoires, ou logiquement « incompatibles » (« *incompatible* »), si et seulement s'il existe un énoncé σ de leur système primaire commun « qui les *départage* » (« *which separates them* »), c'est-à-dire un énoncé σ qui est tel que $\vdash A \supset \sigma$, alors que $\vdash B \supset \sim \sigma$ (Demopoulos 2013d, p. 116-117). Autrement dit, d'après la définition du concept d'équivalence théorique que donnait Ramsey (1929, 1931), il ne peut pas y avoir deux théories qui soient formellement contradictoires, mais qui aient le même contenu-O, c'est-à-dire qui soient, en même temps, logiquement « compatibles avec les mêmes 'données empiriques' » (« *compatible with the same 'data'* ») (Demopoulos 2013d, p. 117). Il est,

d'ailleurs, possible de démontrer une telle conclusion, pour des théories dont le formalisme relève de la logique du premier ordre, en ayant recours à un autre théorème de William Craig (1957), c'est-à-dire le théorème dit « d'interpolation » (« *interpolation theorem* ») (Demopoulos 2013d)²⁶². Un tel résultat s'applique également aux énoncés de Ramsey (1929, 1931), ${}^R A$ et ${}^R B$, que l'on peut associer aux théories en question, puisque les premiers se distinguent des secondes seulement par le fait que

²⁶² Plus précisément, Demopoulos (2013d) explique qu'il est possible d'étayer cette affirmation de Ramsey (1929, 1931) par « une simple application de l'interpolation de Craig [(1957)] et du théorème de compacité » (« *a straightforward application of Craig interpolation and the compactness theorem* ») (Demopoulos 2013d, p. 117). Cet autre théorème de Craig (1957) – que l'auteur présentait sous la forme d'un lemme permettant de se servir du théorème de Herbrand-Gentzen afin de mettre en relation la théorie des modèles et la théorie de la démonstration (« *relating model theory and proof theory* ») (Craig 1957) – affirme, en effet, que, étant données des formules « A », « B », « A' » et « B' » d'un système formel de la logique prädicative du premier ordre, « si $\vdash A \supset A'$ et si A et A' ont un paramètre [c'est-à-dire un signe] de prédicat en commun [*a predicate parameter in common*], alors il existe une formule 'intermédiaire' [*'an intermediate formula'*] B qui est telle que $\vdash A \supset B$, que $\vdash B \supset A'$ [c'est-à-dire une formule ' B ' qui est telle qu'on puisse l'interpoler entre ' A ' et ' A' ', dans le cadre d'une chaîne déductive donnée], et que tous les paramètres de B soient à la fois des paramètres de A et des paramètres de A' . En outre, si $\vdash A \supset A'$ et si A et A' n'ont pas de paramètres en commun, alors soit $\vdash \sim A$, soit $\vdash A'$ » (Craig 1957, p. 270). Quant au théorème de compacité, ce dernier affirme le suivant : « Soit T une théorie du premier ordre. Alors T possède un modèle si et seulement si toute sous-théorie finie [c'est-à-dire tout sous-ensemble fini des énoncés] de T possède un modèle » (« *Let T be a first-order theory. Then T has a model iff every finite subtheory of T has a model* ») (Button & Walsh 2018, p. 75). Revenons, par conséquent, aux théories formalisées A et B , dont on a dit qu'elles sont logiquement incompatibles, et considérons également les ensembles de formules C_A et C_B , qui représentent, respectivement, la clôture déductive de A et la clôture déductive de B . Comme A et B sont incompatibles, l'ensemble $C_A \cup C_B$ est incohérent, non seulement du point de vue syntaxique, mais également du point de vue sémantique, si bien qu'il ne possède aucun modèle. C'est pourquoi l'on peut utiliser le théorème de compacité pour démontrer qu'il existe un certain nombre (au moins un) de sous-ensembles de formules $\Sigma_A \cup \Sigma_B \subseteq C_A \cup C_B$, tels que $\Sigma_A \subseteq C_A$ et $\Sigma_B \subseteq C_B$, qui sont, eux aussi, syntaxiquement et sémantiquement incohérents, ou inconsistants, puisqu'ils ne possèdent pas de modèles (Halbach 2010). Par conséquent, soient « σ_A » et « σ_B », respectivement, la conjonction de toutes les formules appartenant à des sous-ensembles de la forme Σ_A qui ne contiennent que des termes observationnels et la conjonction de toutes les formules appartenant à des sous-ensembles de la forme Σ_B qui ne contiennent que des termes observationnels. Nous pouvons donc en déduire que $\vdash \sigma_A \supset \sim \sigma_B$. Cela implique que nous pouvons nous servir du théorème d'interpolation de Craig (1957) pour en conclure qu'il existe une formule « σ », qui appartient au langage observationnel que partagent « σ_A » et « σ_B », et qui est telle que $\vdash \sigma_A \supset \sigma$ et $\vdash \sigma \supset \sim \sigma_B$. Il en découle que, si la formule « σ » est vraie, alors la formule « σ_B » est fausse, si bien qu'on peut l'utiliser pour falsifier la théorie B , tandis que si « σ » est fausse, alors nous pouvons en conclure, par contraposition, que la formule « σ_A » l'est également, si bien que l'on peut s'en servir pour falsifier la théorie concurrente, c'est-à-dire A . Cela nous montre, justement, que, si les théories A et B sont logiquement incompatibles entre elles, alors il est impossible qu'elles soient toutes les deux logiquement compatibles avec la totalité des énoncés que l'on peut exprimer dans le langage observationnel qu'elles partagent (Demopoulos 2013c, p. 167).

tous les termes théoriques qui figurent dans celles-ci ont été remplacés par des variables d'ordre supérieur au premier. En conséquence, dans la mesure où cette substitution ne change pas ce qu'on pourrait appeler la « structure inférentielle » des théories en question, c'est-à-dire les conséquences que l'on peut en déduire dans le vocabulaire observationnel, nous pouvons en conclure qu'« il ne peut pas exister deux énoncés de Ramsey [(1929, 1931)], incompatibles entre eux, qui soient tous les deux compatibles avec tous les [mêmes énoncés observationnels, ou énoncés-O,] que l'on peut tenir pour vrais » (« *there cannot be two incompatible Ramsey sentences both of which are compatible with all the true O-sentences* ») (Demopoulos 2013d, p. 117).

La structure inférentielle d'une théorie formalisée dépend, cependant, des relations logiques qu'entretiennent, les uns avec les autres, les termes et les énoncés qui y figurent, c'est-à-dire que, dans le cas d'un calcul qui a la structure logique d'une théorie (simple) des types, elle dépend de la position qu'occupent lesdits termes et lesdits énoncés au sein de la hiérarchie de types qui structure le langage formel en question, et donc de la catégorie logique de ces derniers. Il en découle que « ramseyfier » une théorie donnée signifie en élucider la structure inférentielle en mettant au jour la structure catégorielle (explicite ou implicite) qui la sous-tend, si bien que remplacer deux théories par leurs énoncés de Ramsey (1929, 1931) revient à « éliminer, en en faisant abstraction par quantification existentielle » (« *existentially generalize away* ») (Demopoulos 2013d, p. 116), toutes les différences entre leurs formalismes respectifs qui ne découlent pas de leurs structures catégorielles et, par conséquent, de leurs structures inférentielles. Cela signifie, précisément, éliminer toutes les différences entre les systèmes secondaires des théories en question qui ne se traduisent pas par des différences que l'on pourrait exprimer par des déductions dans tel ou tel système primaire. Nous pouvons donc en conclure, d'une part, que le lien logique que l'on peut établir entre un certain énoncé de Ramsey (1929, 1931) et la théorie correspondante consiste précisément en ceci que ces derniers partagent la même structure catégorielle et, d'autre part, que deux énoncés de Ramsey (1929, 1931) qui ont la même structure catégorielle sont parfaitement équivalents. C'est précisément en partant de ces prémisses que l'on peut en déduire que les énoncés de Ramsey (1929, 1931) ne dépendent que de la catégorie des termes qui y figurent, ce qui n'est rien d'autre qu'une variante de la thèse structuraliste de Demopoulos (2013c). De plus, ces mêmes prémisses nous permettent également d'en déduire qu'un énoncé de Ramsey (1929, 1931) exprime le contenu empirique de la théorie à laquelle on peut l'associer, et cela précisément en vertu du fait qu'il ne dépend que de sa structure catégorielle et que cette dernière est la même structure que celle de la théorie en question. Nous pouvons donc en conclure que la thèse structuraliste de Demopoulos (2013c) implique directement le présupposé que « $P \stackrel{\text{def}}{=} R\mathbf{TC}$ », et donc également le présupposé que « $A_T \stackrel{\text{def}}{=} R\mathbf{TC} \supset \mathbf{TC}$ », à savoir les présupposés fondamentaux de la vision dichotomique de la conception classique des théories scientifiques que

prônait Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000). Cela signifie qu'une telle vision dichotomique de la conception classique se traduit par une interprétation structuraliste de cette dernière, où les énoncés de Ramsey (1929, 1931) et les énoncés de Carnap (1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) jouent un rôle fondamental. L'importance de ce rôle devient, par ailleurs, d'autant plus évidente lorsqu'on prend également en considération un troisième formalisme que l'on peut associer à la conception classique des théories scientifiques. Mais en quoi consiste, par conséquent, cet autre formalisme ? En quoi incarnerait-il la thèse structuraliste dont parle Demopoulos (2013c) ? En quoi nous permet-il de mieux comprendre ce qui caractérise la conception classique des théories scientifiques, non seulement en tant que cadre métathéorique, mais également en tant que cadre conceptuel ?

Plus précisément, il s'agit d'un formalisme que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) qualifiait de « Forme III » (« *Form III* ») (1961a ; Psillos & Carnap 2000, p. 170), et qu'il a présenté, pour la première fois, au cours de sa communication lors de la conférence de l'*American Philosophical Association* qui s'est tenue en 1959, à Santa Barbara. Les raisons qui ont amené Carnap (Psillos & Carnap 2000) à envisager cette troisième manière de reconstruire formellement les théories scientifiques, tout en restant dans le cadre de la conception classique, tiennent aux problèmes qui se posent lorsqu'on se sert, concrètement, d'une théorie qui a été reconstruite d'après la Forme II pour en déduire des énoncés particuliers qui contiennent des termes théoriques, tels que, par exemple, l'énoncé « Demain, la température moyenne à Santa Barbara sera de 30°C », à l'aide d'autres énoncés de la même nature, comme l'énoncé « Aujourd'hui, la température moyenne à Santa Barbara est de 27°C ». Comme nous l'avons vu plus haut, en tant que formalisme, la Forme II nous permet d'exprimer, sans perte d'informations, le contenu empirique de telle ou telle théorie, **TC**, dans un langage observationnel logiquement étendu, **L'O**, et cela, précisément, par l'intermédiaire de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) que l'on peut associer à la théorie en question. Par conséquent, si l'on considère une « théorie de la température », **TC**(θ), qui soit à même, justement, de donner une définition partielle du concept de température, désigné par le terme théorique « θ », par rapport à $n - 1$ autres termes théoriques, « t_i », et à m termes observationnels, « o_i », il est toujours possible de reformuler une telle définition partielle en termes purement observationnels au moyen de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) **^RTC**(θ), que l'on peut représenter, schématiquement, de la manière suivante :

$$(\exists u_1), \dots, (\exists u_\theta), \dots, (\exists u_n) \mathbf{TC}(u_1, \dots, u_\theta, \dots, u_n, \dots, o_1, \dots, o_m)$$

où $u_1, \dots, u_\theta, \dots, u_n$ sont les variables (existentiellement quantifiées) que l'on peut substituer aux n termes théoriques, « t_i », et u_θ est, plus précisément, la variable qui remplace le terme théorique

« θ ». Cela dit, comment peut-on mobiliser cette définition pour mettre en relation les deux énoncés particuliers que nous avons évoqués plus haut et que nous désignerons dorénavant, respectivement, par les signes « T_2 » et « T_1 » ? Avant tout, il est nécessaire d'expliciter la nature fonctionnelle de la variable u_θ au moyen d'une fonction propositionnelle, « $\varphi(x, y)$ », que l'on peut définir comme étant n'importe quelle fonction numérique qui permet d'affirmer que tel ou tel couple ordonné (x, y) , dont le premier élément est une coordonnée spatiale tridimensionnelle et le second élément est une coordonnée temporelle, est associé à une certaine valeur de la grandeur « température moyenne d'une ville », telle qu'on peut la mesurer en suivant la procédure opérationnelle que décrit un certain postulat-C, dans lequel figure la fonction « φ » elle-même. En conséquence, si « c_{SB} » est le terme observationnel qui permet d'identifier l'emplacement géographique de la ville de Santa Barbara, « $\tau(c_{SB})$ » est la fonction qui permet de transformer ce dernier dans un triplet de coordonnées spatiales et « $t(auj)$ » est la fonction qui permet d'associer une coordonnée temporelle au terme observationnel « aujourd'hui », alors nous pouvons exprimer tout le contenu empirique de l'énoncé « T_1 » dans un langage observationnel étendu, L'_O , en écrivant l'énoncé suivant :

$$(\exists u_1), \dots, (\exists \varphi(x, y)), \dots, (\exists u_n) [TC(u_1, \dots, \varphi(x, y), \dots, u_n, \dots, o_1, \dots, o_m) \wedge \varphi(\tau(c_{SB}), t(auj)) = 27^\circ C].$$

Ainsi, il en découle que, si nous souhaitons nous servir de ce même langage pour exprimer la connexion déductive que l'on peut établir entre « T_1 » et « T_2 », au moyen de la théorie $TC(\theta)$, nous devons montrer que

$$\vdash (\exists u_1), \dots, (\exists \varphi(x, y)), \dots, (\exists u_n) [(TC(u_1, \dots, \varphi(x, y), \dots, u_n, \dots, o_1, \dots, o_m) \wedge \varphi(\tau(c_{SB}), t(auj)) = 27^\circ C) \supset \varphi(\tau(c_{SB}), t(auj) + 1) = 30^\circ C].$$

Comme nous pouvons facilement le remarquer, et comme l'observait également, mais en des termes plus généraux, Carnap (Psillos & Carnap 2000), bien qu'il soit toujours possible de se servir de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) $RTC(\theta)$ comme définition partielle du terme théorique « température » dans un langage observationnel étendu, ce choix comporte de graves inconvénients lorsqu'il s'agit d'appliquer une telle définition à des cas concrets, et donc de remplacer le terme en question par la totalité du système de relations logiques que décrit l'énoncé $RTC(\theta)$. Serait-il donc possible d'envisager, tout en restant dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, une méthode qui nous permettrait de fournir « des définitions explicites [c'est-à-dire

non conditionnelles] pour tous les termes théoriques [qui figurent dans une théorie donnée] dans [un] langage observationnel [étendu] » (« *explicit definitions for all the theoretical terms in the observation language* ») (Psillos & Carnap 2000, p. 168) ?

De premier abord, une telle question pourrait sembler contradictoire, vu que, comme nous l'avons précisé à maintes reprises, le volet sémantique de la conception classique, en tant que métathéorie des théories scientifiques, consiste précisément dans une théorie de l'interprétation du langage formel par le biais duquel sont reconstruites les théories scientifiques comme interprétation partielle et indirecte des termes descriptifs du langage théorique en fonction des termes descriptifs du langage observationnel et d'un certain nombre de constantes logiques. Il en découle qu'une telle théorie exclut toute possibilité de donner une définition explicite, et donc inconditionnelle, des termes abstraits du langage formel en question, que ce soit par le biais de règles sémantiques directes ou par référence à des termes observationnels. Néanmoins, comme l'expliquait Carnap (1961a) lui-même, la métathéorie sémantique qui caractérise la conception classique des théories scientifiques nous interdit de définir explicitement une certaine classe de termes théoriques, en fonction d'une certaine classe de termes observationnels, par l'intermédiaire des « constantes logiques primitives du langage que l'on utilise » (« *primitive logical constants of the language used* ») seulement si de telles constantes « possèdent une interprétation complète et bien déterminée, comme il est normalement le cas » (« *have a well determined complete interpretation, as is usually the case* »), et donc seulement si le langage en question ne contient que des constantes logiques primitives qui sont « déterminées (par rapport à [son] interprétation) » (« *determinate (with respect to interpretation)* ») (Carnap 1961a, p. 162). En conséquence, s'il était possible de formuler une définition de tel ou tel terme descriptif du langage théorique en question qui consiste à mettre une constante logique sémantiquement « indéterminée » (« *indeterminate* ») (Carnap 1961a, p. 162) en relation avec une certaine classe de termes descriptifs du langage observationnel correspondant, l'on pourrait définir ce même terme d'une manière qui serait explicite, mais, en même temps, non pas entièrement et définitivement déterminée. Cela dit, est-ce qu'il existe effectivement des constantes logiques d'une telle nature ? C'est précisément pour répondre à une telle question que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) prend en examen, aussi bien dans sa communication datant de 1959 que dans sa contribution à un ouvrage, consacré aux fondements des mathématiques, qui a paru en 1961, deux opérateurs logiques particuliers, c'est-à-dire deux constantes qui ne désignent pas des entités logico-mathématiques, mais des opérations formelles, et notamment des opérations qui consistent à choisir le représentant d'une classe donnée.

Le premier de ces deux opérateurs est ce que Carnap (1961a) appelait l'« opérateur iota » (« *iota operator* »), et qu'il désignait, justement, par le symbole « ι » (Carnap 1961a, p. 163). Plus

précisément, il s'agit d'un opérateur qu'avaient déjà caractérisé Frege (1892, 1893), Whitehead et Russell (1910), ainsi que Hilbert et Bernays (1934), si bien que Carnap (1956b, 1961a) pouvait y recourir pour définir le concept de « *description* [définie] » (« *decription* ») (Carnap 1956b ; 1997, p. 88) d'un individu donné, dans le cadre d'un certain langage formel, de la manière suivante : il s'agit d'une formule de la forme « $(\iota x)(\dots x \dots)$ », que l'on peut interpréter comme signifiant « l'unique individu x tel que $\dots x \dots$ » (« *the one individual x such that $\dots x \dots$* ») (Carnap 1956b ; 1997, p. 88), où « $(\dots x \dots)$ » est une « matrice d'énoncé » (« *sentential matrix* »), du langage formel en question, dans laquelle « x figure comme variable libre » (Carnap 1956b ; 1997, p. 88) – c'est-à-dire une expression qui désigne la classe d'énoncés à laquelle on souhaite appliquer l'opérateur iota –, et « ιx » désigne, justement, l'opération qui nous permet de sélectionner, au moyen de l'opérateur iota, l'individu unique que l'on entend substituer à la variable x pour chacune de ses instances dans la matrice d'énoncé qui constitue la portée de l'opérateur en question. Il en découle que la constante logique « opérateur iota » est sémantiquement indéterminée, et cela précisément parce que, bien qu'elle serve à formuler des descriptions définies, elle ne désigne pas, ou du moins pas nécessairement, un individu bien défini. En effet, comme l'expliquait Carnap (1956b) lui-même, toute opération visant à sélectionner l'individu unique qui remplirait les conditions qu'exprime la matrice d'énoncé, de la forme « $(\dots x \dots)$ », qui constitue la portée de tel ou tel opérateur iota aboutit toujours à l'un de deux résultats possibles : (1) Dans l'univers du discours du langage en question, il existe effectivement un seul et unique individu dont on peut vérifier qu'il satisfait la condition exprimée par la portée d'un tel opérateur, si bien que l'on peut affirmer que cette dernière, et donc également l'expression « $(\iota x)(\dots x \dots)$ » tout entière, satisfait la « condition d'unicité » (« *uniqueness condition* ») (Carnap 1956b, p. 88)²⁶³. Dans ce cas, l'opérateur iota nous permet de sélectionner un individu bien déterminé, qui est pris comme « *descriptum* » (Carnap 1956b, p. 88) de la description en question. (2) La description en question ne satisfait pas la condition d'unicité, puisqu'aucun individu de l'univers du discours qui est visé par l'opération de sélection ne remplit la condition exprimée par la portée de l'opérateur iota, ou bien parce qu'il existe au moins deux individus de ce même univers qui la satisfont. Dans ce cas, l'opérateur iota, lorsqu'il est appliqué à la variable x , ne désigne pas un individu bien déterminé, mais un « *descriptum* [qui est] commun à toutes les descriptions qui ne satisfont pas à la condition d'unicité » (« *the common descriptum of all descriptions which do not satisfy the uniqueness condition* »), et qui peut consister dans n'importe

²⁶³ En termes formels, « Soit ' $\dots x \dots$ ' une matrice (d'énoncé, dans [un système formel] S_1), où x figure comme l'unique variable libre. ' $\dots x \dots$ ' (et aussi ' $(\iota x)(\dots x \dots)$ ') satisfait la *condition d'unicité* (dans S_1) $\stackrel{\text{def}}{=} (\exists z)(x) [\dots x \dots \equiv (x \equiv z)]$ est vrai (dans S_1) (' $x \equiv z$ ' signifie ' x est le même individu [*'is the same individual'*] que z ') » (Carnap 1956b ; 1997, p. 88).

quelle valeur du parcours de signification de la variable en question. C'est pourquoi Carnap (1956b) proposait de le désigner par la variable « a^* » (Carnap 1956b ; 1997, p. 94)²⁶⁴.

L'autre opérateur que considérait Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) est l'« opérateur epsilon », ou « opérateur ε » (« ε -operator ») (Carnap 1961a, p. 156 ; Psillos & Carnap 2000, p. 169). Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, cet opérateur a été introduit par Hilbert (1923, 1928), ainsi que par Hilbert et Bernays (1939), afin de définir les quantificateurs de la logique des prédicats dans le cadre d'un langage finitiste, mais il a été par la suite, pour ainsi dire, « étendu » à la théorie des ensembles, dans le but de fournir des fondements solides à l'« axiome du choix » (« *axiom of choice* ») (Fraenkel & Bar-Hillel 1958)²⁶⁵. Tout comme l'opérateur iota, l'opérateur epsilon n'est pas une constante logique qui désigne un individu bien défini. Bien au contraire, c'est une constante qui exprime une « fonction de sélection (non spécifiée) » (« *unspecified selection function* ») (Carnap 1961a, p. 157), et plus précisément une fonction qui nous permet, étant donnée une fonction propositionnelle « $\varphi(x)$ » qui ne contient pas d'autres variables libres que x , de sélectionner un individu de l'univers du discours en question qui satisfait une telle fonction, pourvu qu'il existe au moins un individu qui la satisfasse, et de le désigner par le terme « $\varepsilon_x \varphi$ », sans avoir à

²⁶⁴ « Ou bien il existe un individu y tel que y est l'unique individu pour lequel ... y ... vaut, et -- y -- ; ou bien il n'existe pas de tel individu, et -- a^* -- » (« *Either there is an individual y such that y is the only individual for which ... y ... holds, and -- a^* --* »). Par exemple, « ou bien il existe un individu y tel que y est l'unique auteur de *Waverley*, et y est humain [*'y is the only author of Waverley, and y is human'*] ; ou bien il n'existe pas de tel individu y (c'est-à-dire il n'y a aucun auteur de *Waverley* ou il y en a plusieurs), et a^* est humain » (Carnap 1956b ; 1997, p. 54).

²⁶⁵ Formulé pour la première fois par Zermelo (1904) en 1904, l'axiome du choix a fini par devenir l'un des piliers fondamentaux de la théorie axiomatisée des ensembles. Comme l'explique Thomas Jech (2006), l'on peut envisager l'axiome du choix comme étant un axiome qui consiste à affirmer que « toute famille d'ensembles non vides possède une fonction de choix » (« *Every family of non-empty sets has a choice function* ») (Jech 2006, p. 47), où, par « fonction de choix », l'on entend une fonction, f , telle que, si S est une famille d'ensembles et $\emptyset \notin S$, alors $(\forall X \in S) (f(X) \in X)$ (Jech 2006, p. 47). Autrement dit, il s'agit d'un axiome qui postule l'existence d'un ensemble que l'on peut concevoir comme étant le résultat d'une opération qui consiste à sélectionner un élément de chacun des membres qui constituent la famille S – c'est-à-dire à effectuer le produit cartésien de ces derniers et à choisir un élément de l'ensemble produit qui en résulte – au moyen d'une fonction qui nous dirait si tel ou tel objet appartient ou non à l'ensemble en question, sans pour autant préciser en quoi devrait consister une telle fonction. C'est précisément en raison de cela que l'on peut affirmer que l'axiome du choix a un « caractère purement existentiel » (« *purely existential character* ») en ceci qu'il ne postule pas « la possibilité (au moyen des ressources scientifiques qui sont disponible à présent, ou qui le seront dans un futur imprécisé) de construire un ensemble de sélection » (« *the possibility...of constructing a selection set* »), mais, tout simplement, « l'existence [en S] d'un ensemble de sélection, c'est-à-dire la non-vacuité du produit cartésien » des membres d'une telle famille d'ensembles (« *the existence...of a choice set, i.e. the non-emptiness of the Cartesian product* ») (Fraenkel & Bar-Hillel 1958, p. 54-55).

préciser de quel individu particulier il s'agit (Carnap 1961a, p. 156). Comme l'expliquait Carnap (1961a) lui-même, il est possible d'introduire un tel opérateur dans un langage formel L en formulant deux axiomes logiques, dont l'un a été proposé par Hilbert (1923, 1928) lui-même et l'autre par Wilhelm Ackermann (1924, 1925) :

$$(\exists x) F(x) \supset F(\varepsilon_x F)$$

$$(x) (F(x) \equiv G(x)) \supset \varepsilon_x F(x) = \varepsilon_x G(x)$$

(Carnap 1961a, p. 156). Le premier axiome affirme, justement, que l'objet que désigne le terme « $\varepsilon_x F$ » est un terme qui satisfait la fonction propositionnelle « $F(x)$ », à condition qu'il existe au moins un objet x qui la satisfasse, tandis que l'autre nous permet d'en conclure que, si deux fonctions propositionnelles sont logiquement équivalentes, dans le sens où elles prennent les mêmes valeurs pour les mêmes arguments, alors on peut leur assigner le même élément représentatif, ou « représentant » (« *representative* »), « $\varepsilon_x \varphi(x)$ », quelle que soit la nature de la fonction « $\varphi(x)$ » en question. Il s'ensuit que l'opérateur epsilon nous permet de définir le quantificateur existentiel et le quantificateur universel de la manière suivante :

$$(\exists x) F(x) \equiv F(\varepsilon_x F)$$

$$(x) F(x) \equiv F(\varepsilon_x \sim F)$$

(Carnap 1961a, p. 156 ; Psillos & Carnap 2000, p. 169). En conséquence, c'est précisément au moyen de ces deux axiomes, ainsi que par le biais du concept de description définie, que Carnap (1956b, 1961a ; Psillos & Carnap 2000) proposait d'étendre ultérieurement le langage L'_0 , en y introduisant les opérateurs « ε » et « ι ». Mais comment pourrait-on donc se servir d'un tel langage étendu pour établir un troisième formalisme, à intégrer à la conception classique des théories scientifiques, qui nous permette, justement, de donner des définitions explicites, en fonction d'une classe de termes observationnels, des termes théoriques qui figurent dans telle ou telle théorie ?

C'est précisément afin de répondre à une telle question que Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) a élaboré une troisième manière de reconstruire formellement la structure et le contenu de telle ou telle théorie qui diffère du formalisme de la « Forme II » précisément en ceci que la conjonction des postulats de signification pour les termes théoriques, A_T , y est reformulée en tant qu'énoncé du langage observationnel étendu L'_0 , doté des opérateurs « ε » et « ι », c'est-à-dire en tant qu'énoncé

A'_T . Considérons, dans le but de reconstruire les arguments de Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000), une théorie $TC(t, o)$, où

$$t \stackrel{\text{def}}{=} \langle t_1, \dots, t_n \rangle$$

$$o \stackrel{\text{def}}{=} \langle o_1, \dots, o_m \rangle$$

si bien que nous pouvons réécrire la conjonction de postulats A_T , c'est-à-dire l'énoncé de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) qui correspond à la théorie $TC(t, o)$, de la manière suivante :

$$A_T: (\exists u) TC(u, o) \supset TC(t, o)$$

(Carnap 1961a, p. 160 ; Psillos & Carnap 2000, p. 168), où $u \stackrel{\text{def}}{=} \langle u_1, \dots, u_n \rangle$ est, par conséquent, une variable qui a la structure d'un n -uplet de variables d'ordre inférieur, u_i . Mais de quelle manière Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) proposait-il donc de traduire A_T en A'_T afin que l'on puisse donner des définitions explicites, mais non pas entièrement déterminées, des n termes théoriques « t_i » ? Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) préconisait de remplacer l'énoncé A_T par une conjonction de postulats $A'_T{}^i$, où l' i -ème postulat ne serait pas autre chose qu'une définition explicite, en fonction de quelques constantes logiques et d'une certaine classe de termes observationnels, de l' i -ème terme théorique de l' n -uplet $t \stackrel{\text{def}}{=} \langle t_1, \dots, t_n \rangle$. Pour ce faire, il est possible de procéder de manière « pseudo-inductive », en commençant par formuler, au moyen de l'opérateur « ε », un postulat, pour ainsi dire, « zéro », qui est donc le suivant :

$$A'_T{}^0: t = \varepsilon_u TC(u, o)$$

(Carnap 1961a, p. 161 ; Psillos & Carnap 2000, p. 170). Ce postulat zéro n'est, en conséquence, rien d'autre qu'un axiome qui permet de définir de manière inconditionnelle, et donc explicite, l' n -uplet de termes théoriques $t \stackrel{\text{def}}{=} \langle t_1, \dots, t_n \rangle$ comme étant le représentant de la fonction propositionnelle $TC(u, o)$, c'est-à-dire de la matrice de l'énoncé de Ramsey (1929, 1931) qui est associé à la théorie en question. C'est donc à partir d' $A'_T{}^0$, c'est-à-dire à partir du présupposé que l'on puisse choisir un certain n -uplet de termes théoriques qui satisfasse $TC(u, o)$, que l'on peut formuler, par la suite, un « premier » postulat, $A'_T{}^1$ dont la fonction est de fournir une définition explicite, quoique toujours par rapport à une certaine classe de termes observationnels o , pour le terme théorique « t_1 » $\in t$:

$$A'_T{}^1: t_1 = (\exists x) [(\exists u_1), \dots, (\exists u_n) (TC(u_1, \dots, u_n, o) \wedge x = u_1)].$$

Une fois que l'on a défini « t_1 » au moyen d' $A'_T{}^1$, l'on peut définir tous les autres $n - 1$ termes « t_i » par le biais d'autant de postulats $A'_T{}^i$, en itérant toujours le même schéma axiomatique

$$A'_T{}^i: t_i = (\exists x) [(\exists u_1), \dots, (\exists u_1), \dots, (\exists u_n) (TC(u_1, \dots, u_i, \dots, u_n, o) \wedge x = u_i)].$$

(Carnap 1961a, p. 161 ; Psillos & Carnap 2000, p. 170), d'où l'aspect pseudo-inductif de la démarche de Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000), qui consiste, justement, dans le fait que les différents postulats de signification pour les termes théoriques sont formulés sur la base d'une étape d'initialisation, $A'_T{}^0$, qui pose, en retour, les jalons pour l'application itérative d'un (pseudo)schéma d'induction, $A'_T{}^i$. Cette démarche aboutit, *in fine*, à une reformulation de la conjonction de postulats A_T dans un langage observationnel étendu L'_O , en tant que conjonction du postulat zéro et des n postulats que l'on a pu formuler grâce à l'itération d'un seul et même schéma axiomatique :

$$A'_T: A'_T{}^0 \wedge A'_T{}^1 \wedge \dots \wedge A'_T{}^n$$

(Psillos & Carnap 2000, p. 170).

Une telle méthode de définition explicite des termes théoriques rappelle, en conséquence, les positions opérationnalistes de Bridgman (1927, 1936, 1938, 1945, 1951a, 1951b, 1951c), qui estimait nécessaire de concevoir la définition d'un concept théorique tel que, par exemple, le concept de « courant électrique » comme étant la somme logique des définitions que l'on peut donner des différents éléments d'une certaine classe de concepts partiels, dont chacun correspond, justement, à une manière distincte de mesurer l'intensité d'un courant électrique donné. L'on peut observer, néanmoins, que les postulats de signification tels qu' A'_T possèdent un avantage par rapport aux définitions des opérationnalistes en ceci qu'ils évitent d'isoler les différents termes partiels dans lesquels on peut éventuellement décomposer la signification de tel ou tel terme théorique, en les arrachant aussi bien aux rapports qu'ils entretiennent les uns avec les autres qu'aux relations qu'ils entretiennent avec d'autres termes théoriques, puisqu'il s'agit de postulats qui font toujours référence à une matrice théorique $TC(\dots x \dots)$ donnée. De plus, comme le rappelait, encore une fois, Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000), les opérateurs logiques « ε » et « ι » permettent de formuler des définitions qui restent quand même incomplètement déterminées, tout en étant explicites, car

inconditionnelles. Cela découle tout simplement du fait que ces deux opérateurs sont, eux-mêmes, sémantiquement indéterminés. En ce qui concerne l'opérateur « ε », par exemple, sa signification est déterminée par les axiomes de Hilbert (1923, 1928) et d'Ackermann (1924, 1925) que nous avons mentionnés plus haut, mais

seulement dans la mesure où tout ensemble non vide possède exactement un représentant et ce représentant est un élément dudit l'ensemble [*'to the extent that any non-empty set has exactly one representative and that this representative is an element of the set'*]. Si l'ensemble possède plus d'un élément, alors rien ne peut être dit, que ce soit en voie officielle ou non officielle [*'either officially or unofficially'*], au sujet de savoir lequel de ses éléments en est effectivement le représentant (Carnap 1961a, p. 162-163)²⁶⁶.

C'est précisément en cela que les définitions explicites, formulées dans un langage observationnel étendu, que l'on peut obtenir en appliquant les opérateurs logiques « ε » et « ι » remplissent les conditions d'admissibilité dans le cadre d'une vision dichotomique de la conception classique des théories scientifiques, ce qui les rend en mesure de résoudre le problème que soulevait Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) lui-même quant à la possibilité de se servir des énoncés de Ramsey (1929, 1931) et de Carnap (1958, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) pour en déduire des énoncés particuliers qui contiennent des termes théoriques. En outre, il est également possible de montrer qu' A_T n'est rien d'autre qu'une conséquence logique de l'axiome de Hilbert (1923, 1928), « $(\exists x) F(x) \supset F(\varepsilon_x F)$ », et de la définition du postulat $A'_T{}^0$: si l'on remplace « $F(x)$ » par « $TC(u, o)$ » dans ledit axiome, l'on obtient, en effet, l'énoncé « $(\exists u) TC(u, o) \supset TC(\varepsilon_u TC(u, o), o)$ », dans lequel on peut, ensuite, substituer le terme théorique « t » au terme représentatif « $\varepsilon_u TC(u, o)$ », grâce à $A'_T{}^0$, ce qui nous permet d'en déduire, précisément, « $(\exists u) TC(u, o) \supset TC(t, o)$ », c'est-à-dire A_T .

En conséquence, la Forme III dont parlait Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000) constitue une véritable traduction (dans un langage qui est complètement dépourvu de termes théoriques) du formalisme de la Forme II, dont nous avons montré en quoi il constitue le volet syntaxique d'une interprétation dichotomique de la conception classique des théories scientifiques. De plus, cet autre formalisme nous permet également de montrer en quoi une telle interprétation dichotomique de la

²⁶⁶ Pour ne faire qu'un exemple, le terme « $\varepsilon_x(x = 1 \vee x = 2 \vee x = 3)$ » désigne une opération qui permet de choisir soit le nombre 1, soit le nombre 2, soit le nombre 3, mais il ne désigne aucun de ces trois résultats possibles, en tant qu'entités mathématiques (Carnap 1961a, p. 163).

conception classique est également de nature structuraliste, dans le sens du terme que nous avons explicité plus haut (Psillos 1999 ; van Fraassen 2008 ; Demopoulos 2013c). Un tel formalisme permet, en effet, d'éliminer complètement les termes théoriques qui figurent dans une théorie donnée, en les définissant de manière explicite au moyen de constantes logico-mathématiques et de termes observationnels, et donc, par ce même biais, de réduire les entités abstraites, en tant que constructions syntaxiques, que désignent ces mêmes termes à des relations logiques entre entités observables. Autrement dit, l'on peut considérer le formalisme de la Forme III comme étant, tout simplement, une application, pour ainsi dire, « pratique » du présupposé, justement, structuraliste d'après lequel les véritables objets de notre connaissance seraient les relations que l'on peut établir, entre des données des sens ou, plus généralement, entre des contenus observationnels en se servant des outils de la logique formelle. Plus précisément encore, il est possible de considérer un tel formalisme comme étant une application pratique de la thèse structuraliste dont parlait Demopoulos (2013c), c'est-à-dire de la thèse d'après laquelle les contenus factuels des théories scientifiques se résument à des énoncés, les énoncés de Ramsey (1929, 1931), qui sont doués d'un sens empirique, mais dont le sens dépend uniquement de leur structure catégorielle. La raison en est que le formalisme de la Forme III permet de faire ressortir le « structuralisme existentialisé » (« *structuralism existentialised* ») (Psillos 1999) qui sous-tend l'interprétation carnapienne des énoncés de Ramsey (1929, 1931), et qui se traduit par le présupposé qu'admettre la vérité d'un énoncé tel que ${}^R\mathbf{TC}$ signifie admettre non pas « l'existence d'entités théoriques de la physique » (« *physical theoretical entities* »), mais, tout simplement, la vérité des « conséquences observables [*observable consequences*'] de la théorie originaire \mathbf{TC} », l'existence d'« une certaine structure logico-mathématique dans laquelle est encadrée une certaine description des phénomènes observables » (« *a certain logico-mathematical structure in which (a description of) the observable phenomena are embedded* »), ainsi que la vérité de « quelques affirmations abstraites qui postulent l'existence de classes non vides d'entités qui réalisent la structure en question », quelle que soit la nature desdites entités (« *certain abstract existential claims to the effect that there are (non-empty classes of) entities which realise the structure* ») (Psillos 1999, p. 53). Par conséquent, c'est justement en raison du fait qu'un formalisme de cette nature constitue l'une des formulations possibles de son volet (méta)syntaxique que l'on peut en conclure que la vision dichotomique de la conception classique que prônait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) est également une vision structuraliste.

Il s'ensuit que c'est précisément à partir de notre analyse des différents formalismes qu'a établis Carnap (1961a ; Psillos & Carnap 2000), dans le but de sauver la distinction entre l'analytique et le synthétique, que nous pouvons affirmer que la vision dichotomique et structuraliste de la conception classique des théories scientifiques que défendait ce dernier nous permet de mieux caractériser la

nature des contraintes qu'une telle conception impose, en tant que cadre conceptuel, aux théories qui sont reconstruites en son sein. Premièrement, nous pouvons mieux préciser en quoi consiste la contrainte de symétrie inférentielle dont nous avons parlé dans les sections précédentes, en ceci que c'est précisément cette contrainte, telle que nous l'avons décrite plus haut, qui constitue la condition de possibilité de l'existence d'une seule et unique fonction inférentielle que l'on pourrait attribuer aux différentes théories scientifiques, et plus généralement au système unifié de la science. À la lumière de cette considération, nous pouvons donc en conclure que la contrainte de symétrie inférentielle joue un rôle essentiel pour la réduction de l'architecture de concepts qui caractérise une théorie donnée à une structure, conçue comme étant réseau de relations formelles entre des termes qui désignent des contenus observationnels (Demopoulos 2013c), dans la mesure où elle nous permet de considérer une telle architecture comme étant un simple outil d'inférence. Deuxièmement, la possibilité d'éliminer concrètement les termes théoriques de la reconstruction d'une théorie donnée, à l'aide de constantes logiques sémantiquement indéterminées, nous permet de mieux préciser en quoi consiste la contrainte ontologique que nous avons également associée à la conception classique en tant que cadre conceptuel. Une telle possibilité nous permet, en effet, de clarifier la nature du double standard qui s'applique à la portée ontologique des termes théoriques et à celle des termes observationnels. Il en découle, par conséquent, que la différence essentielle entre la portée ontologique des premiers et celle des seconds consiste en ceci que les termes observationnels prennent nécessairement la forme de constantes descriptives sémantiquement déterminées, alors que les termes théoriques peuvent être remplacés par des constantes logiques sémantiquement indéterminées. Cela nous permet donc de relever le fait que les caractères logiques et ontologiques de ces deux classes de termes se résument aux différentes fonctions qu'ils accomplissent au sein du langage de la science, à savoir, respectivement, une fonction représentative et une fonction inférentielle. Troisièmement, le fait que, dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques telle que l'envisageait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), les caractères logiques et ontologiques des termes théoriques se réduisent à la fonction inférentielle qu'exercent ces derniers nous permet également de mieux caractériser la troisième contrainte que nous avons précédemment associée à la conception classique en tant que cadre conceptuel, c'est-à-dire une contrainte de nature cognitive, qui porte sur la nature des concepts primitifs et déduits des sciences empiriques (Feigl 1970) par opposition aux concepts logico-mathématiques. Comme l'observait Carnap (1966) lui-même, les seconds sont des concepts fermés, c'est-à-dire entièrement définissables en termes purement logiques, en ceci qu'ils désignent, par l'intermédiaire des termes qui y sont associés, des entités qui sont de nature logico-mathématique, et non pas des entités ou des processus physiques. D'après la conception des objets mathématiques que Carnap (1939, 1956a, 1958) avait empruntée à

Wittgenstein (1922), de telles entités ne sont donc rien d'autre que des « quasi-objets », qu'il est possible de réduire, par conséquent, à des constructions syntaxiques. Les concepts primitifs et déduits des sciences empiriques, tels que les envisage la conception classique dans l'interprétation qu'en donnait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) sont, au contraire, des concepts ouverts, qui ne sont donc pas explicitement définissables en termes de constantes logiques, à moins qu'il ne s'agisse de constantes logiques qui sont, en elles-mêmes, sémantiquement indéterminées. Cela découle du fait que les composantes purement logico-mathématiques des termes que représentent de tels concepts, en tant que schémas conceptuels généraux, servent uniquement à établir un lien de désignation, quoique partiel et indirect, entre des constructions syntaxiques et des classes d'entités observables, comme le montre, justement, le formalisme de la Forme III. C'est précisément pour une telle raison que l'on peut considérer les constructions syntaxiques que désignent ces mêmes termes comme étant plus réelles, dans un sens empiriste du terme, que les entités que désignent les termes qui représentent les concepts des sciences formelles. En conséquence, c'est précisément dans la mesure où elle sert à mieux formuler ces trois types de contraintes substantielles, et non pas seulement formelles, que la vision dichotomique et structuraliste de la conception classique des théories scientifiques que prônait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) nous permet d'envisager cette dernière comme étant non seulement un cadre métalinguistique et métathéorique, mais également un véritable cadre conceptuel. Nous pouvons donc en conclure que notre analyse de la conception classique des théories scientifiques nous permet de formuler une définition structuraliste de ce qu'est un cadre conceptuel. Cela dit, en quoi une telle définition de la nature des cadres conceptuels s'appliquerait-elle au cas de la Synthèse Moderne ? En quoi nous permettrait-elle d'explicitier les caractéristiques qui font de cette dernière un cadre conceptuel ? Quelles sont les problématiques philosophiques et historiographiques que pourrait mettre en lumière une analyse de la Synthèse Moderne qui se situerait dans un tel système de référence ?

Seconde partie

En quoi la théorie synthétique de l'évolution constitue-t-elle un cadre conceptuel ? Une analyse de la théorie synthétique au carrefour entre la reconstruction formelle et la contextualisation historique

Vue d'ensemble sur la seconde partie

Nous verrons, dans un premier moment (chapitre 1), en quoi l'hypothèse d'après laquelle l'on pourrait délimiter le périmètre d'une « théorie synthétique » – aussi bien comme théorie génétique de l'évolution que comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie – qui serait issue de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, soulève maints problèmes interprétatifs. C'est pourquoi nous tâcherons de définir un ensemble de problématiques qui nous permettront de représenter la biologie de l'évolution, ou les « études évolutives » (« *evolutionary studies* ») (Smocovitis 1996) sous la forme d'un espace théorique tridimensionnel. Cette représentation abstraite nous permettra, ainsi, d'identifier des couples de thèses opposées, qui ont trait, respectivement, à la place de la sélection naturelle dans l'ensemble des facteurs évolutifs, aux relations entre gènes et organismes relativement à la question de savoir en quoi consiste l'objet de l'évolution, ainsi qu'aux liens qui existent les processus micro-évolutifs et les processus-macro-évolutifs. C'est sur la base de ces différents couples d'oppositions que nous dégagerons, par la suite, deux hypothèses alternatives, de nature aussi bien historiographique qu'épistémologique, qui portent sur la nature et sur les origines de la théorie synthétique, à la fois comme théorie génétique de l'évolution et comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie. Nous nous concentrerons tout particulièrement sur l'une de ces deux hypothèses, c'est-à-dire sur celle que l'on peut associer aux analyses de William B. Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Stephen Jay Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), et qui consiste à affirmer que la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel se serait construite sur le fondement de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par l'intermédiaire de ce que Gould (1983) lui-même a qualifié de « durcissement » (« *hardening* ») de la Synthèse Moderne. Nous montrerons en quoi un tel processus peut être compris comme étant le résultat de la manière dont les modèles de la génétique théorique des populations, en tant que fondements mêmes de la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution, ont imposé des contraintes à l'édification de la théorie synthétique comme cadre conceptuel. Nous présenterons également les raisons pour lesquelles on peut considérer que de telles contraintes émaneraient, à leur tour, d'une vision adaptationniste de l'évolution, telle que l'ont définie – implicitement ou explicitement – Gould et Richard Lewontin (1979), d'une part, et George C. Williams (1992), de l'autre. Afin d'étayer notre thèse, nous analyserons un exemple paradigmatique, c'est-à-dire la manière dont Theodosius Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) a fini par élaborer une version particulière de la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel, qui se fondait sur une réinterprétation du modèle du « paysage adaptatif » (« *adaptive landscape* ») de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) –

c'est-à-dire d'un modèle qui relève de la génétique théorique des populations – et que l'on pourrait, justement, qualifier d'« adaptationniste ». Cela nous amènera ainsi à soulever les questions suivantes : Comment pourrions-nous mieux déterminer en quoi consistent de telles contraintes ? En quoi la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous avons tirée de notre analyse de la conception classique des théories scientifiques pourrait-elle constituer un outil pertinent pour analyser la manière dont les modèles de la génétique théorique des populations ont structuré le cadre conceptuel de la théorie synthétique, ainsi que pour reconstruire formellement ce même cadre ? Dans un second moment (chapitre 2), nous nous pencherons sur ces autres questions en prenant en considérations deux propositions d'axiomatisation de la théorie synthétique de l'évolution, à savoir, d'une part, celle qui a été proposée par Michael Ruse (1973) et, d'autre part, celle qui a été proposée par Mary B. Williams (1970) et Alexander Rosenberg (1985). Pour ce faire, nous analyserons également les deux dernières éditions de *Genetics and the Origin of Species* (Dobzhansky 1951, 1970), afin de mettre en lumière la manière dont la conception classique des théories scientifiques pourrait nous aider à mieux comprendre la façon dont les rapports entre niveau génotypique et niveau phénotypique sont conceptualisés dans le cadre de la théorie synthétique, notamment en ce qui concerne la sélection naturelle. Notre analyse des thèses de Dobzhansky (1951, 1970) nous amènera ainsi à la conclusion que, afin de comprendre la structure et le contenu de la théorie synthétique, il est nécessaire d'envisager la sélection naturelle en termes dynamiques. C'est pourquoi nous introduirons également un troisième terme de comparaison, c'est-à-dire l'interprétation de la théorie de l'évolution (ou plus précisément de la théorie de la sélection naturelle) comme théorie des forces qui a été élaborée par Elliott Sober (1984a). Ce faisant, nous pourrions analyser à la fois les points de force et les points de faiblesse de la conception classique des théories scientifiques comme cadre conceptuel. En particulier, nous nous concentrerons sur la question de savoir si la théorie de la cognition qui sous-tend la conception classique – c'est-à-dire l'idée que les concepts théoriques des sciences empiriques seraient des concepts ouverts – constitue un facteur pertinent pour comprendre les spécificités de la théorie synthétique de l'évolution. En particulier, nous nous demanderons si l'incapacité de prendre en considération les fondements génétiques de la sélection naturelle que manifeste l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) ne serait pas autre chose que le reflet d'un défaut plus fondamental de la conception classique des théories scientifiques. C'est pourquoi nous concluons notre analyse sur la question suivante : en quoi les problèmes que nous avons relevés dans l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) nous obligeraient-ils à en conclure que la conception classique ne constitue pas un modèle pertinent pour la reconstruction formelle de la théorie synthétique ?

Chapitre 1

De la synthèse évolutive au programme adaptationniste : quel rôle pour les modèles de la génétique théorique des populations dans l'élaboration de la théorie synthétique ?

Afin d'analyser les rapports qui existent entre les trois aspects de la Synthèse Moderne que nous venons d'identifier, il est nécessaire d'en reconstruire le développement historique et de replacer les questions théoriques et épistémologiques qu'elle a pu soulever dans leur contexte génétique. Plus précisément, si nous considérons la Synthèse Moderne en tant que processus historico-institutionnel, nous pouvons y déceler, de manière schématique, trois phases successives. La première, que nous qualifierons de « phase problématique ou antithétique », s'est déroulée à partir de ce qu'on appelle communément la « redécouverte » des travaux de Mendel (1866), en 1900 (Bateson 1902)²⁶⁷, jusqu'à l'année 1937, c'est-à-dire l'année qui a vu la parution de *Genetics and the Origin of Species (La Génétique et l'origine des espèces)* de Theodosius Dobzhansky (1937). Il s'agit d'une période qui a été marquée, d'une part, par l'exigence de démontrer la compatibilité entre la théorie darwinienne de la sélection naturelle et le modèle mendélien de transmission des caractères héréditaires (Provine 1971, 2001 ; Mayr & Provine 1980, 1998 ; Gayon 1992) – en résolvant, par ce même biais, les problèmes que Darwin (1859, 1868, 1871) avait lui-même laissé ouverts – ainsi que, d'autre part, par les appels pour l'unification des sciences de la vie, afin de contrer toute tentative de les réduire aux sciences physico-chimiques, qui ont été lancés par des biologistes « organicistes » tels que Joseph Needham (1928a, 1928b, 1930), Joseph H. Woodger (1929a), Edward Stuart Russell (1930) et J. B. S. Haldane (1931a). La deuxième phase, que nous qualifierons de « phase unificatrice ou synthétique », consiste dans la phase où la Synthèse Moderne, en tant qu'unification des différents domaines des sciences de la vie dans une perspective évolutionniste, s'est achevée – du moins dans la perception qu'en ont eue les acteurs qui ont participé à un tel processus – au sein de ce que Smocovitis (1996) a appelé « le cadre orienté vers les populations et fondé sur la génétique évolutive de Theodosius Dobzhansky (dérivé du travail accompli par des naturalistes-systématiciens en collaboration avec des généticiens dits 'classiques' et théoriques des populations) » (« *Theodosius*

²⁶⁷ « Pendant trente-cinq ans, le travail de Mendel est passé largement inaperçu [*'went largely unnoticed'*], puis, en 1900, il a été 'redécouvert' de manière indépendante [*'rediscovered' independently'*] par Hugo de Vries (1848–1935), un botaniste hollandais, Carl Correns (1864–1933), un biologiste allemand, et [Eduard] von Tschermak (1871–1962), un naturaliste autrichien » (Morrison 2007, p. 310).

Dobzhansky's population-oriented, evolutionary genetics framework (derived from the work of systematist-naturalists in combination with classical and theoretical population geneticists) ») (Smocovitis 1996, p. 99), ainsi qu'à la suite de « la mise en relation des pratiques hétérogènes de la biologie (par le biais d'une série de dialogues entre travailleurs) » (« *the binding of the heterogeneous practices of biology (through a series of dialogues between workers)* ») (Smocovitis 1996, p. 99). Plus précisément, cette autre période de l'histoire de la Synthèse Moderne est allée de 1937 jusqu'à 1950 et elle a été marquée par la publication, au sein d'une collection intitulée « *Columbia Biological Series* », de quatre ouvrages, touchant à différents domaines des sciences de la vie (génétique écologique et des populations, systématique, paléontologie, botanique), qui ont posé les jalons du cadre conceptuel de la théorie synthétique sur la base, justement, d'une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle²⁶⁸, par la fondation d'une Société pour l'étude de l'évolution (*Society for the Study of Evolution*) aux États-Unis, en 1946, ainsi que par l'organisation, sous les auspices du Comité d'études sur les problèmes communs à la génétique, à la paléontologie et à la systématique (*Committee on Common Problems of Genetics, Paleontology, and Systematics*), d'un premier grand symposium consacré à la question d'une synthèse évolutive des sciences de la vie, qui s'est tenu auprès de l'Université de Princeton, en 1947 (Jepsen, Mayr & Simpson 1949)²⁶⁹. Quant à la troisième phase que nous pouvons identifier dans l'histoire de la Synthèse Moderne, il s'agit d'une phase que nous appellerons « phase réflexive » et qui a coïncidé avec la période où quelques-uns parmi les architectes de la théorie synthétique de l'évolution ont commencé à élaborer une réflexion sur leur propre pratique scientifique, que Mayr (1982) a, par la suite, saluée comme étant le germe d'« une nouvelle philosophie de la biologie » (« *a new philosophy of biology* ») (Mayr 1982, p. 73), c'est-à-dire la période qui s'est écoulée entre le début des années 1950 et celui des années 1980. Plus spécifiquement, cette autre phase de la Synthèse Moderne a été caractérisée par la nécessité d'affirmer l'autonomie disciplinaire du champ d'études qu'un tel processus avait contribué à institutionnaliser dans la phase précédente, c'est-à-dire la « science de l'évolution » (« *evolutionary science* ») ou « biologie évolutive » (« *evolutionary biology* ») (Smocovitis 1996, p. 73-74). En conséquence, c'est

²⁶⁸ Parmi ces textes fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution, l'on peut compter, outre l'ouvrage de Dobzhansky (1937), *Systematics and the Origin of Species (La Systématique et l'origine des espèces)* d'Ernst Mayr (1942), *Tempo and Mode in Evolution (Rythme et modalités de l'évolution)* de George Gaylord Simpson (1944), ainsi que *Variation and Evolution in Plants (La Variation et l'évolution chez les plantes)* de G. Ledyard Stebbins (1950). Voir Smocovitis (1996) et Cain (2001) pour plus de précisions à ce sujet.

²⁶⁹ Pour une analyse de la manière dont le processus d'institutionnalisation de la biologie évolutive qui a été lancé par la fondation de sociétés et de revues savantes comme celles que nous venons de mentionner a contribué à façonner la théorie synthétique de l'évolution comme cadre conceptuel, voir, pour ne faire qu'un exemple, Cain (1993, 2002, 2004, 2009, 2010).

précisément en replaçant les écrits qu'il a publiés à partir des années 1960 dans un tel contexte historique que nous pouvons rendre compte de l'hostilité dont un biologiste de l'évolution tel Ernst Mayr (1982, 1995, 2004) a pu manifester à l'encontre de toute forme de réductionnisme explicatif et théorique visant sa propre discipline comme étant motivée par l'exigence de consolider aussi bien le statut épistémologique que l'assise institutionnelle des sciences de l'évolution. Mais quelles sont donc les préoccupations qui ont animé les autres phases de la Synthèse Moderne ? En partant uniquement de la manière dont nous venons de les présenter, nous pouvons émettre l'hypothèse que les deux premières phases de la Synthèse Moderne aient été caractérisées par la nécessité de dépasser les barrières qui existaient entre différents domaines disciplinaires, voire entre différentes approches, au sein des sciences de la vie. Par conséquent, ce serait précisément une telle préoccupation qui aurait rendu l'*ethos* scientifique que partageaient les architectes de la théorie synthétique, en ce moment historique particulier, perméable à l'influence de la vision scientifique du monde qu'incarnait la tradition de l'empirisme logique. Mais à quoi pourrait-on reconnaître une telle influence ?

En ce qui concerne la phase de la Synthèse Moderne que nous avons appelée « problématique ou antithétique », nous pouvons nous apercevoir de l'influence qu'y a exercée l'empirisme logique si nous nous intéressons à l'itinéraire biographique de Joseph H. Woodger (1921, 1928, 1929a, 1929b, 1930a, 1930b, 1931, 1937, 1939, 1948, 1951, 1952a, 1952b, 1958, 1962, 1968), comme nous y invitent, tout en nuancant l'image qu'on a pu se faire de ce dernier comme tenant dogmatique d'une telle tradition (Hull 1969), Daniel J. Nicholson et Richard Gawne (2015). En effet, avant même de s'intéresser à la logique, aux mathématiques et à l'épistémologie des sciences de la vie, Woodger (1921, 1924, 1931b, 1940, 1945, 1948, 1955) a été, tout au long de sa vie, cytologiste, embryologue et professeur de biologie fondamentale dans des cursus médicaux, si bien que ce sont des questions qui tenaient à la pratique même des sciences biologiques qui l'ont poussé à s'intéresser aux travaux de Whitehead et Russell (1910, 1912, 1913), de Carnap (1934), ou encore de Tarski (1935a, 1956). Plus précisément, Woodger (1929a) a fini par se tourner vers l'approche de l'épistémologie comme analyse logique du langage des sciences qu'incarnaient, de différentes manières, tous ces auteurs dans l'espoir d'y puiser les ressources nécessaires pour dépasser les « antithèses » (« *antitheses* ») qui structuraient, à son avis, le savoir biologique et qui l'empêchaient de progresser vers la constitution d'un corps scientifique unitaire, quoiqu'organisé en plusieurs branches spécifiques²⁷⁰, à savoir les

²⁷⁰ « Les résultats théoriques généraux que l'on a obtenus en menant des investigations dans les domaines de [*'reached by investigations along the lines of'*] la physiologie, de la morphologie expérimentale, de la génétique, de la cytologie et de la morphologie descriptive d'autrefois sont extrêmement difficiles à harmoniser entre eux, quoique, pour plusieurs raisons, ces difficultés ne soient pas manifestes au premier égard [*'are not apparent on a prima facie view'*]. Dès que nous essayons d'accomplir une telle synthèse, nous nous trouvons face à des contradictions qui semblent reposer sur les

antithèses, de nature à la fois empirique et spéculative, entre « structure et fonction » (« *Structure and Function* »), « organisme et environnement » (« *Organism and Environment* »), « préformation et épigénèse » (« *Preformation and Epigenesis* »), « téléologie et causalité » (« *Teleology and Causation* »), ainsi qu'« esprit et corps » (« *Mind and Body* ») (Woodger 1929a, p. 11). L'enjeu de ce processus d'unification ne se résumait, par conséquent, pas tout simplement à l'édification d'un système unitaire des connaissances biologiques, car il comportait deux autres aspects complémentaires, à savoir la clarification de la distinction entre concepts proprement biologiques et concepts métaphysiques inhérents aux sciences de la vie, ainsi qu'une meilleure compréhension des bases empiriques de ces mêmes sciences. C'est pourquoi Woodger (1929a) estimait que, afin de l'accomplir, il était nécessaire de développer l'« aspect critique » (« *critical aspect* ») de la biologie en tant que science naturelle, c'est-à-dire l'aspect « qui a trait à l'investigation de méthodes d'interprétation [des données empiriques] du point de vue de la logique et de l'épistémologie » (« *which has to do with investigating methods of interpretation from the standpoint of logic and epistemology* ») (Woodger 1929a, p. 477). En conséquence, c'est précisément en cela que les préoccupations qui animaient un biologiste que l'on ne saurait qualifier d'« évolutionniste » *stricto sensu*, mais qui était tout de même engagé dans un processus d'unification des sciences de la vie, comme pouvait l'être, justement, Woodger (1929a) rejoignaient quelques-uns des principes fondateurs de la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne, et à l'empirisme logique (Carnap *et al.* 1929). Il s'agit, notamment, de l'idée que l'avancement du savoir scientifique dépendrait toujours de la dissolution des éléments métaphysiques qui sont présents dans tel ou tel domaine de connaissances et de l'enracinement de ce même savoir dans une investigation empirique de la réalité, ainsi que l'idée que la logique, en général, et la reconstruction formelle des théories scientifiques, en particulier, constitueraient des outils indispensables pour atteindre de tels buts. D'ailleurs, c'est précisément à partir de ces mêmes présupposés que l'un des architectes de la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, c'est-à-dire J. B. S. Haldane (1931a), critique, dans un ouvrage consacré aux « fondements philosophiques de la biologie » (« *the philosophical basis of biology* »), le réductionnisme physicaliste au sens explicatif et théorique du terme : « Ceux qui ne s'aperçoivent pas du caractère métaphysique de l'idée reçue, couramment très répandue, [*the metaphysical character of the popular assumption, prevalent at the present time*'] d'après laquelle la réalité interprétée du point de vue des sciences physiques est une réalité 'objective', dans un sens particulier du terme [*that physically interpreted reality is in a special*

antithèses biologiques fondamentales [*we are confronted with contradictions which appear to rest on the fundamental biological antitheses*'] » (Woodger 1929a, p. 12).

sense 'objective' reality'], sont à juste titre perplexes au sujet du rapport entre la biologie et les sciences physiques [*puzzled as to the relation of biology to the physical sciences*']; mais, lorsque l'on s'aperçoit que l'interprétation physique n'a pas de prétention particulière à l'objectivité [*has no special claim to objectivity*'], la confusion se dissipe. C'est tout simplement faire de la métaphysique surannée, et d'en faire une mauvaise [*it is simply metaphysics, and bad metaphysics, long out of date*'], que de présupposer que l'interprétation physique de la réalité est une interprétation parfaitement objective [*a perfect objective interpretation*'] » (Haldane 1931a, p. 71).

Quant à la phase successive de la Synthèse Moderne, que nous avons qualifiée, justement, d'« unificatrice ou synthétique », nous pouvons y retrouver les mêmes préoccupations que nous venons d'identifier chez Woodger (1929a). Bien évidemment, elle a été marquée par l'exigence de parachever l'unification des sciences de la vie autour du phénomène de l'évolution qui s'était amorcée dans la phase précédente, et plus précisément de parachever l'extension de la théorie de Darwin (1859) qu'avait inaugurée la preuve de la compatibilité entre le principe de la sélection naturelle et le modèle mendélien. Cependant, de quelle manière s'est exprimée une telle exigence ? Si l'on croit au témoignage que nous a livré, encore une fois, Ernst Mayr (1993), que l'on peut considérer comme ayant été l'un des protagonistes de cette autre phase de la Synthèse Moderne, l'unification de la biologie n'était pas un but affiché des architectes de la théorie synthétique. Dans un article où il commente les thèses de Smocovitis (1992), Mayr (1993) écrit, en effet, que ces derniers « étaient trop occupés à aplanir les différends qui les opposaient [*straightening out their own differences*] et à réfuter les arguments des anti-darwiniens [*refuting the antidarwinians*] pour avoir du temps à consacrer à un objectif aussi ambitieux [*such a far-reaching objective*] » (Mayr 1993, p. 33). Cette remarque nous suggère, par conséquent, une lecture de la Synthèse Moderne, telle qu'elle s'était achevée au début des années 1950, comme étant, en premier lieu, une réponse aux théories évolutionnistes anti-darwiniennes qui étaient en train de se répandre dans les milieux académiques, principalement en Angleterre et aux États-Unis, entre les années 1870 et les années 1930. Bien que, au début du XX^e siècle, les controverses qu'avait soulevées la publication de l'*Origine des espèces* (Darwin 1859) se fussent soldées par une acceptation généralisée du fait empirique de l'évolution, qui constituait désormais le présupposé fondateur de disciplines telles que la paléontologie, la morphologie comparée et l'embryologie comparée, il n'en était pas autant de l'hypothèse – celle de la sélection naturelle – que Darwin avait lui-même formulée dans le but de rendre compte de ce même fait (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 15). Cette dernière était, en effet, rejetée par les tenants d'un certain nombre de théories évolutives alternatives à celle de Darwin, telles que le « néo-lamarckisme » (« *neo-Lamarckism* »), l'« orthogénèse » (« *orthogenesis* »), le « mutationnisme » (« *mutationism* ») (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 15-16), le « saltationnisme » (« *saltationism* »),

le « geoffroysme » (« *Geoffroyism* ») et le « néo-darwinisme » (« *neo-Darwinism* ») d'August Weismann (1868)²⁷¹. Mais qu'est-ce que toutes ces visions anti-darwiniennes de l'évolution avaient-elles en commun ? En quoi nous permettraient-elles d'établir un lien entre les préoccupations qui animaient les architectes de la théorie synthétique de l'évolution et celles que nous avons identifiées chez Woodger (1929a) ?

Contrairement à l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle, les théories de l'évolution non-darwiniennes (voire explicitement anti-darwiniennes) que nous venons d'énumérer partaient du présupposé que les véritables causes de tous les phénomènes évolutifs seraient des propriétés intrinsèques des organismes ou, plus généralement, du monde organique. Autrement dit, toutes ces différentes théories anti-darwiniennes reposaient sur le présupposé qu'il existerait une sorte de « *vis evolutiva* » qui suffirait, à elle seule, à rendre compte de l'évolution en tant que phénomène biologique et dont l'existence ne serait empiriquement confirmable, du moins si l'on s'en tient à des critères de confirmabilité empirique tels que ceux que l'on retrouve dans la tradition de l'empirisme logique. En cela, l'on peut donc affirmer qu'il s'agissait de théories de nature essentiellement métaphysique, si bien que toute tentative d'établir un cadre conceptuel qui aurait permis de formuler

²⁷¹ Dans son manuel « *Evolutionary Biology* » (« *Biologie évolutive* »), Douglas Futuyma (Futuyma & Kirkpatrick 2017) qualifie de « néo-lamarckienne » toute théorie de l'évolution qui se fonde sur le présupposé de la transmission des caractères acquis. Telle que la définissent aussi bien Futuyma (Futuyma & Kirkpatrick 2017) qu'Ernst Mayr (1998a), l'orthogénèse constitue, en revanche, une famille de théories qui sont très hétérogènes, mais qui partagent toutes un seul et même principe fondamental : l'évolution devrait être considérée comme le résultat d'une tendance vers la perfection organique qui serait intrinsèque à tout être vivant. C'est dans cette catégorie que Mayr (1998a) rangeait, par exemple, les thèses originelles de Lamarck, l'aristogénèse (« *aristogenesis* ») de H. F. Osborn (1893, 1894, 1917), ou encore les idées défendues par Pierre Teilhard de Chardin (1955, 1965). Quant au mutationnisme (Futuyma & Kirkpatrick 2017), ou saltationnisme (Mayr 1998a), il se définit comme une école de pensée évolutionniste qui adhère au postulat de l'émergence de nouveaux types d'organisation biologique par variations discontinues, comme, par exemple, la théorie des mutations de Hugo De Vries (1901, 1903) ou celle que l'on peut déduire des premiers écrits de T. H. Morgan (1916), ainsi que les théories des paléontologues Richard Goldschmidt (1929, 1940) et Otto Schindewolf (1950). En conclusion, par « geoffroysme » et par « néo-darwinisme », Ernst Mayr (1998a) entendait, respectivement, toute théorie de l'évolution « qui impute le changement évolutif à l'influence directe de l'environnement » (« *which ascribes evolutionary change to the direct influence of the environment* »), à l'instar des thèses d'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire (1818, 1822 ; Saint-Hilaire & Cuvier 1824-1842), et toute théorie qui diffère des thèses originaires de Darwin (1859) en ceci qu'elle exclue la possibilité de toute transmission des caractères acquis et qu'elle considère la sélection naturelle comme étant le seul véritable facteur évolutif, en adoptant ainsi une position « pansélectionniste » (« *panselectionist* ») (Mayr 1998a, p. 4-5). Plus précisément, comme l'expliquait Jean Gayon (1992), « Weismann [(1868)] se distinguait de Darwin par deux doctrines radicales et étroitement liées, au nom de l'économie des hypothèses : (1) un refus intégral de l'hérédité des caractères acquis ; (2) la doctrine de l'auto-suffisance explicative du principe de sélection naturelle pour la théorie de l'évolution organique » (Gayon 1992, p. 331). Voir également Bowler (1983) à ce sujet.

« une authentique théorie de l'hypothèse darwinienne » (Gayon 1992, p. 332) – c'est-à-dire une théorie de l'évolution par sélection naturelle qui soit mathématisée et empiriquement confirmable, et qui aurait finalement servi, du moins dans la perception qu'en ont eue les architectes de la théorie synthétique, de vecteur d'unification pour l'ensemble des sciences de la vie autour du phénomène de l'évolution – ne pouvait que prendre, *ipso facto*, l'allure d'une critique de la métaphysique, dans le contexte des sciences de la vie, que l'on pourrait ainsi rapprocher de celle du Cercle de Vienne (Carnap 1932a). En conséquence, c'est précisément dans une telle perspective que nous pouvons situer l'argument par lequel Smocovitis (1996) a tâché de rendre compte des raisons pour lesquelles « au milieu des années 1950, au sommet de la synthèse évolutive, ses architectes (y compris Simpson, Mayr, Huxley et d'autres encore) tendaient à emphatiser excessivement leur sentiment d'unité [*were overstressing their sense of unity*'] » (Smocovitis 1996). Plus précisément, cet argument consiste à affirmer qu'une telle emphase s'expliquerait comme étant une réponse « à des procès en division qui étaient persistants et historiquement induits » (« *persistent and historically induced charges in biology* »), en ceci qu'ils étaient instruits à partir du présupposé que « les sciences physiques [serviraient] de modèles exemplaires pour les sciences biologiques, d'un point de vue historique, logique et épistémique » (« *the physical sciences served as the historical, logical, and epistemic exemplars to the biological sciences* ») (Smocovitis 1996, p. 192). En d'autres termes, nous pouvons en conclure que, tout comme dans le cas de Woodger (1929a), les raisons qui ont poussé les architectes de la Synthèse Moderne à établir, au cours de la phase que nous avons qualifiée d'« unificatrice ou synthétique », un cadre conceptuel commun tenaient à la volonté d'ériger la biologie de l'évolution, en particulier, et la biologie entière, en général, en un savoir empiriquement fondé et délivré de toute relique métaphysique. C'est dans un tel sens que, malgré l'hostilité à l'envers de toute forme de réductionnisme physicaliste que manifesterait, par la suite, des protagonistes d'un tel processus d'unification, il semble justifié d'affirmer que l'*ethos* de cette autre phase de la Synthèse Moderne a été profondément influencé par des présupposés concernant la nature du savoir scientifique que l'on peut faire remonter à la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne, si bien que l'on pourrait considérer la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous avons établi à partir de ces mêmes présupposés comme étant pertinente pour l'analyse de la théorie synthétique, comme cadre conceptuel, qui a constitué l'aboutissement de la Synthèse Moderne elle-même. Cela dit, en quoi consiste, plus précisément, un tel cadre conceptuel ? En quoi serait-il relié au versant, pour ainsi dire, « génétique » de la théorie synthétique, c'est-à-dire la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution ? Quel rôle ont joué les modèles mathématiques de la génétique théorique, ou « classique », des populations dans l'élaboration de la théorie synthétique de l'évolution ? Plus précisément, de quelle manière ces mêmes modèles auraient-ils permis d'édifier la

théorie synthétique non seulement en tant que théorie génétique de l'évolution, mais également en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier moment (section 1.1), en quoi la littérature historiographique la plus récente (Burian 1988 ; Smocovitis 1996 ; Cain 2009 ; Gayon & Huneman 2019) a contribué à émettre des réserves sur l'idée que la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, se serait soldée par l'édification d'un véritable système théorique, c'est-à-dire d'une véritable théorie synthétique. C'est ainsi que Richard Burian (1988), a pu avancer l'hypothèse que la Synthèse Moderne aurait consisté non pas à l'élaborer un cadre conceptuel ou une théorie génétique de l'évolution, mais à permettre aux différents biologistes qui s'y étaient engagés de mettre de côté, quoique de manière temporaire, ce qui les séparait, dans le but d'établir des collaborations fructueuses. Mais est-ce que cela signifie qu'il serait impossible d'identifier des problématiques structurantes qui auraient pu servir de lignes directrices utiles à l'élaboration d'un cadre conceptuel, justement, « synthétique » pour les sciences de la vie, dans une optique évolutionniste ? C'est précisément pour répondre à cette autre question que nous identifierons trois axes problématiques qui constituent autant de dimensions distinctes d'une sorte d'espace théorique que l'on pourrait associer au domaine de la biologie évolutive et qui soient tels que l'on puisse identifier, par leur intermédiaire, des combinaisons de thèses dont on pourrait estimer qu'elles auraient constitué la structure d'une théorie synthétique de l'évolution. Il s'agit, plus précisément, d'axes qui relient, chacun, deux pôles théoriques opposés : premièrement, l'axe qui relie la thèse consistant à mettre l'accent sur l'efficacité de la sélection naturelle en tant que facteur évolutif à la thèse d'après laquelle la sélection ne serait que l'un parmi les facteurs qui déterminent le cours de l'évolution biologique ; deuxièmement, l'axe qui relie la thèse d'après laquelle les gènes constitueraient le véritable substrat des processus évolutifs à la thèse d'après laquelle l'évolution consisterait dans la transmission et l'accumulation de différences entre organismes ; troisièmement, l'axe qui relie la thèse d'après laquelle les processus macro-évolutifs seraient un simple prolongement de processus micro-évolutifs à la thèse qui consiste à affirmer qu'il existerait un écart entre ces deux catégories de processus. À partir de ces trois axes, nous dégagerons, par la suite, deux hypothèses historiographiques et épistémologiques au sujet de la structure et des origines de la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, qui sont alternatives. D'une part, il s'agit de l'hypothèse d'après laquelle la théorie synthétique comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie se serait développée en suivant l'axe thématique « gènes-organismes » et en assimilant, par ce même biais, la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution (Mayr 1980a, 1982, 1998a). D'autre part, il s'agit de l'hypothèse d'après laquelle la théorie synthétique de l'évolution se serait principalement

déployée le long de l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs » et qu'elle aurait fini par constituer, en tant que théorie génétique de l'évolution, le fondement d'un cadre conceptuel pour les sciences de la vie (Provine 1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001 ; Gould 1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002). De plus, elle aurait également contribué à infléchir ce même cadre conceptuel dans un sens « adaptationniste » (Gould & Lewontin 1979). Cela dit, en quoi pourrait-on considérer que ces deux hypothèses sont opposées et en quoi pourrait-on estimer, en revanche, qu'elles sont complémentaires ? De quelle manière serait-il possible de les tester , et notamment de tester la seconde hypothèse, celle qu'ont avancée Provine (1977, 1986) et Gould (1983, 2002) ? Plus précisément, en quoi pourrait-on affirmer que la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution, fondée sur les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations, aurait fini par imposer à la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel une orientation que l'on pourrait qualifier d'« adaptationniste » ?

En conséquence, c'est précisément dans le but d'affronter de telles problématiques que, dans un second moment (section 1.2), nous nous pencherons sur la manière dont Stephen Jay Gould et Richard Lewontin (1979) ont défini le concept même d'« adaptationnisme ». Cela nous permettra, par la suite, de répondre à la question de savoir en quoi l'on pourrait s'en servir pour caractériser la façon dont les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations auraient pu contraindre, à leur tour, la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel, c'est-à-dire en déterminer les fondements conceptuels et empiriques. Plus précisément, nous verrons en quoi, tel que l'entendaient ces derniers, l'adaptationnisme constitue un programme explicatif d'après lequel, afin de pouvoir rendre compte de l'existence de formes organiques qui semblent être parfaitement adaptées aux formes de vie des organismes qui les possèdent, les biologistes devraient adopter une attitude qui soit à la fois, pour ainsi dire, « d'ingénieur » et « d'archéologue ». Une telle attitude consisterait, en effet, à identifier la « conception » ou le « dessin » (« *design* ») de tel ou tel trait phénotypique et de procéder à rebours, en retraçant l'histoire évolutive de ce même trait à partir de la conception que l'on aura repérée, dans le but de montrer en quoi cette dernière aurait été sélectionnée car elle aurait permis au trait en question de remplir telle ou telle fonction de manière optimale. Nous comparerons, ensuite, la définition de Gould et Lewontin (1979) à la manière dont George C. Williams (1992) a lui-même décrit le programme adaptationniste, ce qui nous amènera à y déceler deux principes fondamentaux, que nous appellerons, respectivement, le « principe d'isolement fonctionnel » et le « principe d'optimalité ». Cela nous permettra d'analyser les critiques que Gould et Lewontin (1979) ont eux-mêmes adressées au programme adaptationniste – encore une fois, aussi bien d'un point de vue historique, que d'un point de vue théorico-épistémologique –, ainsi que de mettre au jour les relations que ces mêmes critiques entretiennent avec la thèse d'après laquelle la centralité grandissante des

modèles mathématiques de la génétique des populations aurait entraîné un durcissement de la Synthèse Moderne dans un sens, justement, adaptationniste. Plus précisément, nous verrons en quoi la manière dont Theodosius Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) s'est réapproprié le modèle du paysage adaptatif (« *adaptive landscape* ») de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) – dans le but de rendre compte des différences adaptatives qui permettent de classer les organismes dans les diverses catégories taxonomiques dont se composent les classifications des naturalistes – a abouti à une conception adaptationniste de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel. Dobzhansky (1951) est, en effet, parvenu à donner une interprétation adaptative de la signification biologique de ces mêmes caractéristiques des paysages adaptatifs que Wright (1931a, 1931b, 1932) avait envisagées comme étant une conséquence des interactions épistatiques entre gènes, en les mettant en relation avec des caractéristiques qui sont propres aux conditions de vie des organismes qui possèdent les génotypes dont l'évolution est décrite par tel ou tel paysage adaptatif et qui font en sorte que ces mêmes organismes soient plus ou moins bien adaptés. En conséquence, c'est précisément dans un tel sens que l'on peut affirmer que Dobzhansky (1951) aurait contribué au durcissement de la Synthèse Moderne, en établissant des liens conceptuels de nature adaptationniste entre la théorie génétique de l'évolution de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) et les classifications des systématiciens. Cela dit, de quelle manière pourrait-on mieux caractériser ce en quoi consistent de tels liens conceptuels ? Dans quelle mesure la conception classique pourrait-elle s'avérer un cadre de référence pertinent pour répondre à une telle question, ainsi que, éventuellement, pour reconstruire formellement les liens en question ?

1.1 Quels sont les problèmes qui ont structuré la Synthèse Moderne comme processus historico-institutionnel ? Deux hypothèses historiographiques et épistémologiques

Afin de répondre à la question de savoir en quoi consiste la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel, il est nécessaire de se demander, au préalable, si la distinction entre ce troisième aspect de la Synthèse Moderne, la Synthèse Moderne comme théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et la Synthèse Moderne en tant qu'événement, ou processus, historico-institutionnel est effectivement justifiée. Comme première chose, nous pouvons remarquer qu'il est nécessaire de compléter la périodisation de la Synthèse Moderne, justement en tant que processus historico-institutionnel, que nous venons d'esquisser en y ajoutant une quatrième phase, que nous pourrions qualifier de « phase critique ». Elle s'est inaugurée, au début des années 1980,

par la publication d'un grand nombre de « revues de littérature, commentaires, articles et livres » (« *reviews, commentaries, articles and books* ») qui témoignaient d'« un mal-être croissant, une insatisfaction, une attitude défensive, et une confusion générale » (« *increasing unease, dissatisfaction, defensiveness, and general confusion* ») (Smocovitis 1996, p. 34-35) concernant la nature exacte du cadre conceptuel qui avait émergé de la Synthèse Moderne telle qu'elle s'était déroulée au cours des phases précédentes²⁷². Il est, néanmoins, possible de considérer cet autre moment de la Synthèse Moderne comme étant une conséquence de la réflexion qui avait été amorcée, en 1971, par la publication de *The Origin of Theoretical Population Genetics (Les Origines de la génétique théorique des populations)*, écrit par William B. Provine (1971, 2001) dans le but d'évaluer le rôle qu'avaient joué les modèles mathématiques formulés par des généticiens tels que Sewall Wright (1917a, 1931a, 1931b, 1932), R. A. Fisher (1918, 1930) et J. B. S. Haldane (1924-1932, 1932) dans le développement de la théorie synthétique de l'évolution. Comme l'observait, encore une fois, Smocovitis (1996), une telle réflexion s'était, en effet, prolongée par deux *workshops*, organisés par Ernst Mayr et par Provine lui-même (Mayr & Provine 1980, 1998). Plus précisément, il s'était agi de *workshops* qui s'étaient tenus, respectivement, du 23 au 25 mai 1974 et du 11 au 12 octobre de la même année, auprès de l'Académie américaine des arts et des sciences (*American Academy of Arts and Sciences*) à Boston (Smocovitis 1996, p. 29 ; Gould 2002, p. 518-519), dans le but affiché de réunir les personnalités qui avaient contribué à ériger le cadre conceptuel de la théorie synthétique de l'évolution entre le début des années 1930 et celui des années 1950 – « à l'exception de Bernhard Rensch, qui était malade, de George Gaylord Simpson, qui s'était fâché [avec Mayr], et de Sewall Wright, que Mayr n'avait tout simplement pas voulu inviter » (« *except Bernhard Rensch, who was ill ; G. G. Simpson, who was angry ; and Sewall Wright, whom Mayr simply would not invite* ») (Gould 2002, p. 519) –, des biologistes évolutionnistes de la nouvelle génération, ainsi que des philosophes et des historiens des sciences, afin qu'ils pussent élaborer un diagnostic partagé de l'état de la Synthèse Moderne, ainsi qu'un récit commun de ce même processus historique²⁷³. Les

²⁷² Pour ne citer que quelques exemples, Gould, S. J. (1980). Is a New General Theory of Evolution Emerging?. *Paleobiology*, 6, 119-130; Stebbins, G. L., Ayala, F. J. (1981). Is a New Evolutionary Synthesis Necessary?. *Science*, 213, 967-971; Ayala, F. J. (1982). Beyond Darwinism? The Challenge of Macroevolution to the Synthetic Theory of Evolution. *Philosophy of Science*, 2, 275-291; Gould, S. J. (1982). Darwinism and the Expansion of Evolutionary Theory. *Science*, 216, 380-387; Reid, R. G. B. (1985). *Evolutionary Theory: The Unfinished Synthesis*. Ithaca: Cornell University Press; Eldredge, N. (1985b). *The Unfinished Synthesis: Biological Hierarchies and Modern Evolutionary Thought*. Oxford: Oxford University Press; Depew, D. J., Weber, B. H. (dir.) (1985). *Evolution at a Crossroads: The New Biology and Philosophy of Science*. Cambridge, MA: MIT Press.

²⁷³ Le premier de ces deux *workshops* a vu la participation d'Ernst Mayr, en qualité de président de séance, Mark B. Adams, Ernest Boesiger, Peter Buck, Richard W. Burkhardt Jr., Hampton L. Carson, William Coleman, C. D. Darlington,

contributions des personnalités qui y avaient participé avaient, néanmoins, fini par mettre au jour l'existence d'une pluralité de points de vue, qui portaient aussi bien sur la nature de la théorie synthétique de l'évolution que sur la manière dont elle s'était constituée.

En conséquence, il semblerait que, comme l'a d'ailleurs confirmé Provine (1980, 1998) lui-même, la seule chose sur laquelle ceux que Smocovitis (1992, 1996) a appelés « les nouveaux architectes » de la synthèse (« *the new architects* ») eussent réussi à s'accorder, après de longues discussions, eût justement été le constat qu'une synthèse s'était effectivement accomplie et qu'il s'était agi d'un événement complexe, qui s'était déroulé à plusieurs niveaux, à des allures différentes, et qui nécessitait, par conséquent, une explication de complexité égale²⁷⁴. Aucune conclusion substantielle au sujet du contenu de la Synthèse Moderne en tant que théorie synthétique de l'évolution n'avait, en revanche, pu être tirée, si ce n'était le constat inscrit dans la note historique qui préface l'édition de *Genetics and the Origin of Species* de Dobzhansky (1937, 1982) qui a été établie en 1982 – dans le cadre de la réédition des ouvrages pionniers qui avaient été précédemment publiés, comme nous l'avons déjà remarqué, dans le cadre de la collection intitulée « *The Columbia Classics in Evolution* ». Il s'agit, plus précisément, du constat, très général, que « l'évolution, la thèse que tous les organismes

Theodosius Dobzhansky, E. B. Ford, Bentley Glass, Stephen Jay Gould, Gerald Holton, David L. Hull, E. David Kohn, I. Michael Lerner, Richard C. Lewontin, Camille Limoges, William B. Provine, Dudley Shapere, Otto Solbrig, G. Ledyard Stebbins, Frank Sulloway, Robert L. Trivers et Alexander Weinstein. Quant au second, il a été présidé, encore une fois, par Ernst Mayr et les participants comptaient Mark B. Adams, Garland E. Allen, Frederick B. Churchill, William Coleman, Irvén DeVore, Michael T. Ghiselin, Stephen Jay Gould, John C. Greene, Wayne Gruner, Viktor Hamburger, E. David Kohn, Richard C. Lewontin, Camille Limoges, Everett C. Olson, Ronald Overmann, William B. Provine, Bobb Schaeffer, Dudley Shapere, Frank Sulloway, Daniel Todes, Robert L. Trivers et Alexander Weinstein (Mayr & Provine 1998).

²⁷⁴ « La synthèse évolutive a été un processus très complexe [*a very complex process*']. Son développement historique ne peut pas être appréhendé avec précision par n'importe quelle thèse simple [*its historical development cannot be encompassed accurately by any simple thesis*']. La synthèse s'est produite à plusieurs niveaux. D'aucuns chercheurs s'intéressaient principalement à des phénomènes qui se produisent dans des organismes individuels, au niveau chromosomique, alors que d'autres examinaient des populations entières, en conditions naturelles [*in nature*'], et d'autres encore prenaient en considération des phénomènes macro-évolutifs. La synthèse évolutive a été davantage qu'une simple application de nouveaux concepts génétiques à d'autres facettes de la biologie évolutive, comme l'ont suggéré des récits antérieurs [*The evolutionary synthesis was more than a simple application of new concepts in genetics to other facets of evolutionary biology, as earlier accounts have suggested*']. De plus, la synthèse a procédé à des allures très différentes [*at very different rates*'] dans des domaines différents, ou dans les mêmes domaines mais dans des pays différents, voire dans les mêmes domaines dans différents départements de la même université. Des descriptions précises de ces phénomènes doivent prendre en considération la spécificité des détails qui sont concernés [*the specificity of detail involved*']. Aucune thèse historique simple, aussi lumineuse soit-elle, ne peut décrire tous les éléments essentiels de la synthèse évolutive » (Provine 1980 ; 1998, p. 405).

sont unis par des liens de descendance, est le principe organisateur fondamental de la biologie » (« *Evolution, the proposition that all organisms are related by descent, is the central organizing principle of biology* ») (Gould & Eldredge 1982, p. ix ; cité par Smocovitis 1996, p. 187). En conséquence, c'est précisément dans le sillage des doutes qui avaient commencé à émerger au sujet de la nature de la théorie synthétique de l'évolution que Richard Burian (1988) a pu définir cette dernière, dans un article datant de 1988, comme étant une « cible mouvante » (« *moving target* »), en choisissant ainsi une image métaphorique qui a, par la suite, été reprise à son compte par Smocovitis (1996) elle-même. Plus précisément, Burian (1988) mettait en évidence le caractère changeant de la théorie synthétique de l'évolution, qui serait dû, à son avis, au développement incessant de son contenu, ainsi qu'à la tendance, dont feraient souvent preuve les scientifiques, les philosophes et les historiens qui la critiquent, à la présenter de multiples manières contradictoires²⁷⁵, ce qui compliquerait, d'emblée, toute évaluation (Burian 1988, p. 252). Néanmoins, la raison profonde du flou qui entoure toute tentative de définir ou de critiquer le contenu et la structure de la théorie synthétique résiderait, toujours à l'avis de Burian (1988), dans le fait que l'événement historique qu'on appelle normalement « Synthèse Moderne » aurait consisté moins à énoncer une véritable théorie prédictive, ou rétrodictive, de l'évolution que, pour reprendre une expression de David J. Depew et Bruce H. Weber (1988), à rendre possible la signature d'un « traité de paix » (« *treaty* ») parmi des biologistes qui étaient issus des branches les plus diverses des sciences de la vie. Dans une telle interprétation, la Synthèse Moderne aurait ainsi

fixé les conditions qui ont permis aux biologistes évolutionnistes et aux praticiens de la nouvelle science de la génétique [*'evolutionists and practitioners of the new science of genetics'*] (et plus généralement de la biologie moléculaire) de travailler ensemble selon des présupposés communs [*'under common presuppositions'*]. Les évolutionnistes acceptèrent le weismannisme [*'Weismannism'*], en répudiant leurs

²⁷⁵ Plus précisément, Burian (1988) observait qu'« il est très difficile d'identifier précisément le contenu empiriquement testable de la théorie synthétique [*'getting a precise fix on the testable content of the synthetic theory'*] (que l'on pourrait mesurer par la liste des phénomènes avec lesquels elle est incompatible), d'en délimiter le pouvoir explicatif [*'delimiting its explanatory power'*], et d'en définir précisément les engagements [*'specifying its precise commitments'*]. C'est pourquoi ses opposants en livrent, typiquement, des critiques contradictoires [*'contradictory criticisms'*], par exemple en arguant parfois qu'elle est insuffisante parce qu'elle peut tout expliquer... et parfois qu'elle ne peut rien expliquer (par exemple, parce que ses principes fondamentaux sont tautologiques [*'tautologous'*], ce qui est également erroné). Bien trop souvent, cependant, la version de la synthèse que donnent ses critiques n'est qu'un épouvantail [*'the critics' version of the synthesis is a straw man'*] » (Burian 1988, p. 252).

badinages passés avec le lamarckisme²⁷⁶ [*earlier flirtations with Lamarckism*'], alors que les généticiens acceptèrent les hypothèses gradualistes [*gradualist assumptions*'] de la tradition darwinienne, en renonçant à mettre l'accent sur les macromutations [*abandoning stress on macromutations*']²⁷⁷ (Depew & Weber 1988, p. 317).

En s'inscrivant dans la droite ligne d'une telle interprétation de la Synthèse Moderne, Burian (1988) pouvait donc en conclure que cette dernière se serait avant tout concrétisée par une sorte de « *modus vivendi* » qui aurait permis à des scientifiques issus d'horizons différents de collaborer de manière pacifique et productive, et non pas par un cadre métathéorique cohérent et structuré. Une telle conclusion est tout à fait en adéquation avec celles que l'on peut trouver dans une bonne partie de la littérature historiographique la plus récente.

Pour ne citer qu'un exemple, Joe Cain (2009) a avancé que le concept même de « Synthèse Moderne », en tant qu'unité épistémique et historique, obscurcirait les traits saillants de l'histoire de la biologie évolutive, telle qu'elle s'est déroulée entre le début des années 1930 et celui des années 1940, au lieu de les éclairer. À l'avis de ce dernier, alors que la période successive au début des années 1940 aurait été caractérisée par « un effort délibéré de construire une discipline, la traduction explicite [de problèmes et de solutions d'une discipline à l'autre] et la prédominance d'un petit nombre de thématiques et de personnalités » (« *deliberate discipline building, explicit translation, and the dominance of a few themes and people* ») (Cain 2009, p. 642), la phase immédiatement précédente de l'histoire de la Synthèse Moderne aurait été moins marquée par l'édification d'un cadre commun que par la recherche de nouvelles manières d'affronter des « combinaisons complexes de problèmes » (« *problem complexes* »), telles que « la variation, la divergence, l'isolement et la sélection »

²⁷⁶ Il faut remarque que Depew et Weber (1988) utilisent ici le terme « lamarckisme » comme synonyme du terme « néo-lamarckisme », qui a été forge par le naturaliste américain Alpheus S. Packard Jr. (1901) en 1884 afin de désigner toutes les théories qui présupposaient l'héritabilité des caractères acquis et l'existence de forces motrices internes aux organismes comme causes de l'évolution. En cela, les théories néo-lamarckiennes s'opposaient aux thèses des néodarwiniens tels qu'August Weismann (1883, 1892), qui les critiquaient en avançant trois arguments principaux : 1) la quantité de preuves empiriques en faveur du néo-lamarckisme était faible ; 2) il n'y avait aucun mécanisme connu pour transférer les adaptation somatiques (corporelles) à la lignée germinale ; 3) il était extrêmement improbable que des changements au niveau des organes puissent se traduire en changements au niveau chromosomique (Bowler 1983, 1988, 2003 ; Jablonka & Lamb 2014).

²⁷⁷ Dans le cadre de la génétique évolutive « post-synthétique », les mutations sont conçues comme étant des altérations de la structure d'un gène qui augmentent la variabilité d'une population en favorisant l'émergence de nouveaux caractères. Néanmoins, le terme « mutation » (« *Mutation* ») fut originellement introduit et popularisé au début du XX^e siècle par des généticiens tels que Hugo de Vries (1901, 1903), qui s'en servait pour désigner des changements génétiques de grande ampleur, capables d'engendrer instantanément une nouvelle sous-espèce, voire une nouvelle espèce (Bowler 1983, 2003).

(« *variation, divergence, isolation, and selection* »), qui étaient étroitement liées à la problématique plus générale des « processus de spéciation » (« *speciation processes* ») (Cain 2009, p. 626). De tels problèmes nécessitaient, en effet, d'être « décomposés » (« *decomposed* ») de manière analytique, ce qui n'aurait jamais pu se produire sans que des biologistes issus de plusieurs disciplines eussent eu la possibilité de se fédérer autour d'un certain nombre de questions de recherche partagées. En conséquence, toujours d'après Cain (2009), une telle exigence aurait créé les conditions nécessaires à l'émergence d'une synthèse plurielle qui aurait consisté dans la convergence de perspectives différentes le long de trois lignes directrices principales : la naissance d'une « nouvelle systématique » (« *new systematic* »), ou « systématique populationnelle » (« *population systematics* ») (Huxley 1940, Mayr 1942), sous la forme d'une « taxonomie expérimentale » (« *experimental taxonomy* ») (Cain 2009, p. 628), un intérêt grandissant pour les phénomènes de spéciation, ainsi que pour les combinaisons complexes de problèmes qui y étaient associées (Cain 2009, p. 632), ainsi qu'un « déplacement de l'attention » (« *shift in attention* ») portée aux « objets zoologiques » (« *zoological objects* ») vers les « processus biologiques » (« *biological processes* ») (Cain 2009, p. 638-639). Il semblerait, par conséquent, que la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, aurait abouti moins à la construction d'un cadre conceptuel qu'à l'émergence de ce que Jean Gayon (Gayon & Huneman 2019) suggérait d'appeler, en empruntant une expression forgée par Stephen Toulmin (1972), « une 'généalogie de problèmes' (concepts, théories, techniques et méthodes) » (« *a 'genealogy of problems' (concepts, theories, techniques, and methods)* ») (Gayon & Huneman 2019). Mais en quoi serait-il donc possible d'identifier des problèmes structurants que l'on retrouverait dans toutes les phases de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, que nous venons d'énumérer ? En quoi de tels problèmes pourraient-ils nous permettre d'éclairer la manière dont s'est constituée la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, ainsi que comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie, malgré l'existence d'une pluralité de perspectives qu'ont mise en avant, entre autres, Cain (2009) et Gayon (Gayon & Huneman 2019) ? Quel rôle ont joué les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », dans l'élaboration de la théorie synthétique, toujours en tant que théorie génétique de l'évolution et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

Afin de répondre à de telles questions, nous nous pencherons, dans un premier temps (section 1.1.1), sur deux citations issues, respectivement, d'un texte d'Ernst Mayr (1980a) et d'une lettre de Huxley (Huneman 2014, 2017 ; Gayon & Huneman 2019). Ces deux citations nous permettront, en effet, d'identifier trois axes thématiques qui constituent autant de problématiques autour desquelles se serait déployée la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, et qui

définissent, par conséquent, une sorte d'espace théorique pour la biologie évolutive, à savoir un axe « sélection-autres facteurs évolutifs », un axe « gènes-organismes » et un axe « microévolution-macroévolution ». Cela dit, en quoi ces trois axes, et donc ces trois problématiques, pourraient-ils nous servir à mieux éclairer la nature des deux acceptions de la théorie synthétique de l'évolution que nous venons d'identifier, ainsi que leurs relations mutuelles ? Pour répondre à cette autre question, nous prendrons en considération la reconstruction de la structure et des origines de la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, que nous a fournie Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a). Plus précisément, nous analyserons la manière dont ce dernier a identifié deux « traditions de recherche » (« *research traditions* ») (Laudan 1977), qui auraient constitué, à son avis, les fondements de la théorie synthétique de l'évolution. La première tradition est celle des « naturalistes-évolutionnistes », qui aurait été caractérisée par ce que Mayr (1975, 2006) appelait lui-même la « pensée populationnelle » (« *population thinking* »), alors que la seconde est celle des « biologistes expérimentaux », et notamment des généticiens mendéliens ou des généticiens des populations « classiques », que Mayr (1975, 2006) associait à ce qu'il qualifiait, en utilisant encore une fois un terme qu'il avait lui-même forgé, de « pensée typologique » (« *typological thinking* »). Une telle analyse nous permettra, ainsi, d'en conclure que, aux yeux de Mayr (1980a, 1982, 1998a), la théorie synthétique se serait avant tout constituée en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, autour de l'axe thématique « gènes-organismes » et au moyen de l'assimilation de la tradition de recherche des biologistes expérimentaux par celle des naturalistes-évolutionnistes. Il en découle que, dans une telle reconstruction de la théorie synthétique de l'évolution, la pensée populationnelle aurait constitué la condition même de la possibilité que la vision darwinienne qu'incarnait la Synthèse Moderne se déploie également le long des deux autres axes de l'espace théorique que nous venons d'associer à la biologie évolutive. Une telle manière d'envisager la théorie synthétique, ainsi que le processus historique dont elle était issue, s'opposait à l'interprétation qu'en avaient donnée, par exemple, William B. Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Stephen Jay Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002). Aux yeux de ces derniers, les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », auraient, en effet, joué un rôle beaucoup plus déterminant dans l'édification de la théorie synthétique, aussi bien en tant que théorie génétique de l'évolution qu'en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, que celui que Mayr (1980a, 1982, 1998a) avait bien voulu leur attribuer. Dans un premier temps, leur rôle aurait consisté, plus précisément, à « contraindre », ou à « restreindre », l'éventail des facteurs explicatifs que l'on pouvait invoquer pour rendre compte de tel ou tel phénomène évolutif, c'est-à-dire à écarter, justement, tous les « facteurs évolutifs » dont les naturalistes et les généticiens avaient précédemment postulé

l'existence, à l'exception des mutations, de la dérive génétique aléatoire, des migrations (ainsi que des flux de gènes qui y sont associés) et de la sélection naturelle²⁷⁸. Dans un second temps, leur rôle aurait évolué, si bien qu'ils auraient fini par promouvoir un « durcissement » (« *hardening* »), tel que l'appelait Gould (1983, 2002) lui-même, de la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, dans un sens, pour ainsi dire, « adaptationniste ». Cela dit, de quelle manière se seraient exercées ces deux fonctions ? En quoi la façon dont les envisageaient Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), par opposition à Mayr (1980a, 1982, 1998a), nous permettrait-elle de répondre à la question de savoir si la Synthèse Moderne se serait effectivement déroulée autour des trois axes thématiques que nous avons identifiés plus haut et à celle de savoir si la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel ne serait rien d'autre qu'une extension de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle ?

C'est précisément dans le but de répondre à ces autres questions que, dans un second temps (section 1.1.2), nous présenterons un exemple paradigmatique de modèle mathématique de la génétique des populations, dite « classique », c'est-à-dire un modèle qui permet de décrire, moyennant quelques présupposés idéalisés, la variation de la composition génotypique d'une population donnée sous l'action de deux facteurs évolutifs, ou de deux causes évolutives, à savoir la sélection naturelle et une pression de mutation (Crow & Kimura 1970). Cet exemple nous amènera, par conséquent, à mettre en lumière la manière dont cette classe de modèles est liée aux conséquences mathématiques des lois de Mendel (1866), ainsi que la manière dont elle a permis non seulement d'éclairer les relations qui existent entre les concepts de variation, d'hérédité et de sélection – c'est-à-dire trois concepts clés de la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle –, mais également de représenter les causes des changements évolutifs sous la forme de couples « fréquence-coefficient ». C'est à partir de tels présupposés que nous pourrions poser la question de savoir en quoi ont consisté les contributions que la génétique des populations, dite « classique », aurait apportées au

²⁷⁸ D'ailleurs, c'est précisément dans un tel sens que nous interprétons ce qu'a pu écrire Jean Gayon (1992) au sujet de la portée explicative de la génétique (théorique) des populations : « En pratique, la génétique des populations ne dit pas grand chose sur la manière dont l'évolution s'est effectivement produite. Telle qu'elle s'est édifiée dans les années 1920 et 1930, et telle qu'elle est demeurée pour l'essentiel, elle a les allures d'une topique transcendante de la science de l'évolution : - elle organise les 'lieux', les figures rhétoriques, de ce qui est argumentable dans la théorie évolutionniste moderne. Dans ce nouveau contexte théorique, la sélection naturelle n'est plus un principe fondamental, mais un paramètre mesurant une 'force' de changement parmi d'autres. En dépit des parti-pris affichés de ses fondateurs, la génétique théorique des populations n'est pas par soi-même 'darwinienne'. Si elle est cependant apparue comme la version théorique moderne du darwinisme, c'est au sens où elle a formalisé les conditions dans lesquelles la sélection pourrait être un facteur prépondérant de l'évolution biologique » (Gayon 1992, p. 334).

développement de la théorie synthétique (à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie) par l'intermédiaire de ces mêmes modèles. C'est pourquoi nous nous pencherons, par la suite, sur un article de Provine (1977) qui nous permettra d'en conclure que les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », auraient constitué l'élément moteur d'une « synthèse scientifique », au sens bachelardien du terme, qui aurait abouti à deux résultats majeurs : premièrement, elle aurait abouti à l'élaboration de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle ; deuxièmement, elle aurait abouti à l'établissement d'un véritable cadre conceptuel pour les sciences de la vie, fondé sur le présupposé de la suffisance explicative de la sélection naturelle telle que permettait de l'envisager, justement, la théorie synthétique en tant que théorie génétique. Il en découle que, aux yeux de Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et de Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), la théorie synthétique de l'évolution se serait articulée à partir de l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs » et que les deux acceptions du terme « théorie synthétique de l'évolution » que nous avons distinguées plus haut, à savoir, justement, la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie et la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, seraient l'une la conséquence logique de l'autre, et non pas l'inverse. Autrement dit, dans cette autre interprétation de la théorie synthétique de l'évolution, le cadre conceptuel qui a émergé de la Synthèse Moderne se serait constitué autour d'un noyau théorique qui aurait consisté, précisément, dans la théorie synthétique en tant que théorie génétique²⁷⁹. Ce faisant, nous aurons donc identifié deux hypothèses alternatives, de nature à la fois historiographique et épistémologique, au sujet de la structure et des origines de la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie. Cela dit, en quoi serait-il possible de les mettre à l'épreuve, et notamment d'en mettre à l'épreuve la seconde, que nous pourrions nommer « l'hypothèse de Provine-Gould » ?

²⁷⁹ Pour reprendre les mots mêmes de John Beatty (1986), « le noyau de la théorie synthétique [*the core of the synthetic theory*] se réduit presque entièrement à la seule génétique théorique des populations [*just the theory of population genetics*], qui a été développée par Sergueï Tchétverikov [(1927)], J. B. S. Haldane (1924-1932), R. A. Fisher (1930) et Sewall Wright [(1931a)] et qui se fonde sur ce qu'on appelle le 'principe d'équilibre de Hardy-Weinberg' [*the so-called 'Hardy-Weinberg equilibrium principle'*] » (Beatty 1986, p. 127).

1.1.1 Quels liens entre la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution et la théorie synthétique comme cadre conceptuel ? « Assimilation » ou « constriction » ?

En rejoignant en cela, comme nous venons de le voir, Burian (1988), Smocovitis (1996) et Cain (2009), Jean Gayon (Gayon & Huneman 2019) considérait que le versant historico-institutionnel de la Synthèse Moderne primerait sur ses aspects théorico-conceptuels, vu que, à son avis, l'apport le plus fécond de la Synthèse Moderne aurait précisément consisté dans « l'exemplarité d'un groupe de personnes qui ont créé une matrice disciplinaire²⁸⁰ pour [l'étude de] l'évolution » (« *the exemplarity of a group of people who created a disciplinary matrix for evolution* ») (Gayon & Huneman 2019). Quant à la synthèse en tant que théorie, toujours selon Gayon (Gayon & Huneman 2019), elle ne serait, essentiellement, rien d'autre que la répétition monotone de deux thèses centrales, qui existaient avant qu'un tel processus historique et institutionnel ne se déroulât et qui ont, par ailleurs, demeuré inchangées tout au long de ce dernier, si bien que « d'une certaine manière, l'on peut parler de différentes versions historiques de la théorie synthétique..., au sens littéral de 'théorie', et non pas au sens d'« événement institutionnel » » (« *in a sense, one can speak of various historical versions of the synthetic theory..., in the literal sense of a theory, not an institutional event* ») (Gayon & Huneman 2019). Mais en quoi consistent ces deux thèses ? Comme l'indiquait Gayon (Gayon & Huneman 2019) lui-même, la réponse à une telle question se trouve dans ce qu'écrit Ernst Mayr (1980a, 1998a) dans le prologue à l'ouvrage, intitulé « *The Evolutionary Synthesis. Perspectives on the Unification of Biology* » (« *La Synthèse évolutive. Perspectives sur l'unification de la biologie* »), qui rassemble les actes de la conférence que ce dernier et William B. Provine avaient organisée en 1974, et dont nous avons déjà parlé plus haut. Plus précisément, Mayr (1980a, 1998a) affirmait que le terme « synthèse évolutive » (« *evolutionary synthesis* ») avait été forgé par Julian Huxley (1942) afin de désigner deux conclusions qui étaient devenues largement répandues parmi les biologistes qui s'intéressaient à la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle :

²⁸⁰ Comme le rappelait Gayon (Gayon & Huneman 2019) lui-même, le terme « matrice disciplinaire » (« *disciplinary matrix* ») renvoie à l'une des acceptions possibles du concept de « paradigme » tel que le définit Thomas Kuhn (1970b, 1977) aussi bien dans la postface à la deuxième édition de *La Structure des révolutions scientifiques (The Structure of Scientific Revolutions)* que dans un article postérieur : « 'disciplinaire', parce qu'il s'agit d'une possession commune des praticiens [*common possession of the practitioners*'] d'une discipline professionnelle, 'matrice', car le paradigme est composé d'éléments ordonnés de types divers [*ordered elements of various sorts*]', à savoir des « généralisations symboliques » (« *symbolic generalizations* »), des « modèles » (« *models* ») et des « exemplaires » (« *exemplars* ») (Kuhn 1977 ; 1990, p. 396).

que l'évolution graduelle [*'gradual evolution'*] peut s'expliquer par de petites modifications génétiques ('mutations') [*'in terms of small genetic changes ('mutations')*] et par les effets de la recombinaison génétique [*'recombination'*], ainsi que par l'ordre que la sélection naturelle donne à cette variation génétique [*'the ordering of this genetic variation by natural selection'*]; et que les phénomènes évolutifs observés [*'observed evolutionary phenomena'*], en particulier les processus macro-évolutifs et la spéciation [*'macroevolutionary processes and speciation'*], peuvent s'expliquer d'une manière qui est conforme aux mécanismes génétiques connus [*'consistent with the known genetic mechanisms'*] (Mayr 1980a ; 1998a, p. 1).

Une telle conclusion semble être confirmée par ce qu'a écrit Julian Huxley en 1951, dans une lettre adressée à Mayr lui-même, dont l'objet était précisément la vision de l'évolution qui sous-tendait, du moins à son sens, les différentes contributions qu'il était en train de rassembler dans un livre intitulé « *Evolution as a Process* » (« *L'Évolution comme processus* ») (Huxley *et al.* 1954) : « La sélection naturelle, agissant sur la variation héréditaire fournie par les mutations et la recombinaison d'une constitution génétique mendélienne, est le principal agent de l'évolution biologique » (« *Natural selection, acting on the heritable variation provided by the mutations and recombination of a Mendelian genetic constitution, is the main agency of biological evolution* ») (cité par Huneman 2014, 2017 ; Gayon & Huneman 2019). Mais qu'est-ce qu'on peut déduire, plus concrètement, des passages que nous venons de citer au sujet des thèses fondamentales que l'on pourrait considérer comme étant au fondement de la théorie synthétique de l'évolution, non seulement en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, mais également, et surtout, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

En ce qui concerne la phrase d'Huxley, premièrement, de l'incise « agissant sur...d'une constitution génétique mendélienne », l'on peut en déduire que la Synthèse Moderne, telle que la concevait Huxley, repose sur l'hypothèse que la variation constituant la matière première de l'évolution serait de nature purement génétique, et non pas environnementale. Dans une telle perspective, l'on pourrait ainsi définir l'évolution, en tant que processus naturel, comme étant la variation de la distribution des fréquences géniques d'une population donnée, sur laquelle surviendraient toutes les autres formes de changement évolutif, ce qui constitue le fondement théorique même de la génétique des populations comme science évolutive. Cela implique également l'idée qu'il faudrait découpler l'hérédité – c'est-à-dire l'ensemble des mécanismes de transmission des caractères phénotypiques d'une génération à l'autre – du développement – c'est-à-dire l'ensemble des mécanismes qui régissent la transformation du génotype en phénotype – dans la mesure où seule la première constituerait un ressort de l'évolution (Huneman 2017, p. 72). Deuxièmement, de la

phrase principale « la sélection naturelle est le principal agent de l'évolution biologique », l'on peut en déduire que, dans le cadre de la Synthèse Moderne telle que l'envisageait Huxley, la sélection naturelle est considérée comme étant le principal facteur explicatif des phénomènes d'adaptation que l'on peut observer dans tous les domaines du monde biologique, et donc comme étant l'élément moteur de l'évolution (Huneman 2017, p. 72). Ces deux hypothèses rejoignent, par conséquent, les conclusions dont parlait Mayr (1980a, 1998a), à savoir la conclusion d'après laquelle l'évolution, en tant que changement graduel, serait le résultat de l'action de la sélection naturelle sur de petites variations de nature génétique, ainsi que la conclusion d'après laquelle il serait toujours possible d'expliquer les phénomènes macro-évolutifs sur la base des mêmes mécanismes génétiques qui permettent d'expliquer les phénomènes micro-évolutifs. En conséquence, alors que la Synthèse Moderne en tant qu'événement historique et institutionnel a effectivement pris l'allure d'un processus diversifié et complexe, il faudrait en conclure que la Synthèse Moderne, aussi bien en tant que théorie génétique de l'évolution que comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie, se réduirait à trois thèses fondamentales, qui sont étroitement liées les unes aux autres : (1) quelle que soit leur place dans la hiérarchie de niveaux d'intégration qui caractérise le vivant, la cause de tous les phénomènes biologiques consiste dans un seul et même mécanisme, (2) c'est-à-dire l'action qu'exercent un certain nombre de facteurs évolutifs sur des variations génétiques qui émergent, pour ainsi dire, « de manière aveugle »²⁸¹, (3) dont le principal est précisément la sélection naturelle. Ces trois thèses nous permettent ainsi d'identifier autant

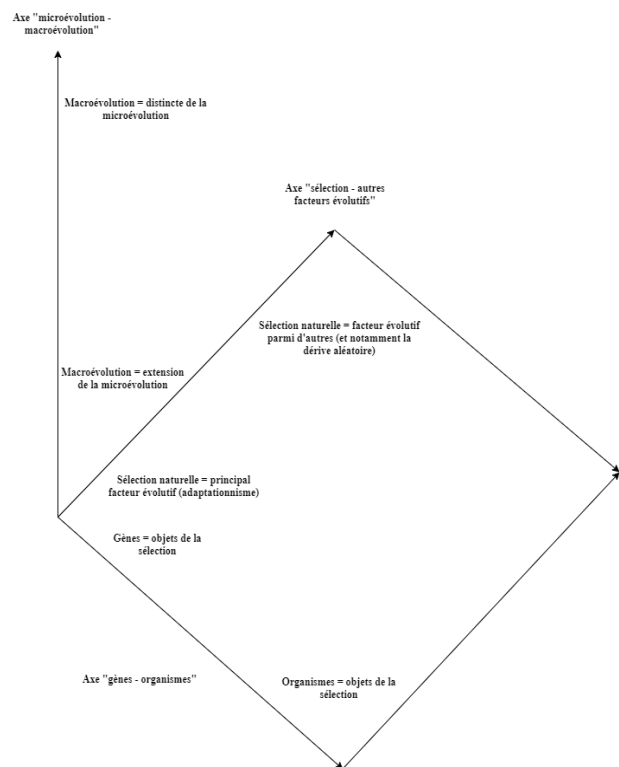


Figure 6 : Espace théorique de la biologie évolutive, inspiré de Huneman (2014)

²⁸¹ Comme le rappelle Huneman (2017), il est nécessaire de faire une distinction entre les concepts d'aléatoire (« *random* ») au sens mathématique du terme et d'aléatoire au sens évolutif du terme, c'est-à-dire l'aléatoire comme « aveugle » (« *blind* »). En effet, poursuit Huneman (2017), « lorsque les biologistes affirment que la variation, y compris la variation diachronique [c'est-à-dire l'ensemble des nouvelles variantes qui sont produites au sein d'une population donnée, à chaque génération successive, par les mutations et par les mécanismes de recombinaison génétique], est aléatoire [*variation, including diachronic variation, is random*]', cela signifie surtout qu'elle n'est pas nécessairement

d'« axes thématiques » dont nous pouvons nous servir afin de caractériser, pour ainsi dire, l'« espace théorique » que l'on peut associer aux sciences de l'évolution telles que se sont constituées au cours du XX^e siècle, et au sein duquel se serait finalement déployée la Synthèse Moderne. Premièrement, nous pouvons identifier un axe « sélection-autres facteurs évolutifs », qui a trait au rôle que l'on peut attribuer à la sélection naturelle en tant qu'agent du changement évolutif, et donc à la troisième des thèses fondamentales que nous venons d'énumérer (Huneman 2014). Deuxièmement, nous pouvons identifier un axe « gènes-organismes », qui tient précisément à la question de savoir si ce sont les gènes ou les organismes, en tant qu'individus biologiques, qui constituent le véritable « objet de la sélection naturelle » (« *object of selection* ») (Mayr 1998c, p. xiii), et donc à la deuxième thèse fondamentale que nous venons d'énoncer (Huneman 2014)²⁸². Troisièmement, nous pouvons également identifier un axe « microévolution-macroévolution », qui tient à la question de savoir si les phénomènes macro-évolutifs, tels que la spéciation ou l'évolution des *taxa* supérieurs, ne seraient rien d'autre que le prolongement, à une échelle supérieure, de phénomènes micro-évolutifs, tels que la variation de la composition génétique des populations, ou bien s'ils seraient des phénomènes émergents, qui surviendraient sur ces derniers. Il s'agit, par conséquent, d'un axe qui a trait la première des thèses fondamentales que nous venons d'évoquer. Cela dit, en quoi pourrait-on affirmer que la théorie synthétique se serait structurée, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la

bénéfique, ou que le fait qu'elle soit bénéfique n'est pas la cause de l'apparition d'une variante donnée, ou n'augmente pas la probabilité qu'elle apparaisse [*'it is not necessarily beneficial, or that the fact that it is beneficial does not cause, or increase the probability, of a given variant'*] – variation 'aveugle' est donc une bien meilleure expression [*'blind' variation is a better phrase'*]. C'est précisément cette propriété des mutations qui a été testée et démontrée empiriquement [*'empirically tested and established'*] dans les années 1950, notamment par les expériences de Luria et Delbrück, et qui a définitivement corroboré le cadre de la Synthèse Moderne [*'that supported definitely the MS framework'*] » (Huneman 2017, p. 91-92).

²⁸² Comme l'observe, encore une fois, Huneman (2014) ces deux premiers axes sont « orthogonaux » (« *orthogonal* ») l'un par rapport à l'autre, du moment que la position que l'on peut adopter le long du premier est indépendante de celle que l'on peut adopter le long du second, et inversement. Pour ne citer qu'un exemple, si la théorie du « gène égoïste » (« *selfish gene* ») de Richard Dawkins (1976) comporte un positionnement sur le premier axe qui se situerait au pôle « sélection » et un positionnement sur l'autre qui se situerait au pôle « gènes », un généticien des populations tel Michael Lynch (2007) se situerait, en revanche, au pôle « gènes » du second axe, mais au pôle « autres facteurs évolutifs » du premier. En effet, bien qu'il « maintienne ironiquement que 'rien n'a de sens en biologie si ce n'est à la lumière de la génétique des populations' » (« *ironically holds that 'nothing in evolutionary biology makes sense except in the light of population genetics'* »), Lynch (2007) « n'attribue pas un rôle prépondérant à l'optimisation [et donc à la sélection naturelle] puisque ses propres modèles montrent que la dérive génétique aléatoire est l'une des causes principales de l'architecture du génome métazoaire » (« *does not ascribe a prominent rôle to optimization since his own models show that drift is one of the main agents of the architecture of the metazoan genome* ») (Huneman 2014, p. 164).

vie, autour de ces trois axes et sur la base d'une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle ? Est-ce que la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel ne serait rien d'autre qu'une extension de la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, ou est-ce qu'il ne s'agirait pas, au contraire, de deux synthèses théoriques de natures différentes ?

Afin de répondre à de telles questions, nous pouvons partir, encore une fois, de la manière dont Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a) a tâché de fournir une interprétation cohérente de la Synthèse Moderne, en revêtant ainsi un (triple) rôle d'« architecte », d'épistémologue et d'historien de la théorie de l'évolution dite « synthétique » – en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie – qui en a résulté. Dans *The Evolutionary Synthesis*, ainsi que dans *The Growth of Biological Thought (La Croissance du savoir biologique)* (Mayr 1982), ce dernier présente, en effet, la théorie synthétique, aussi bien en tant que théorie génétique de l'évolution qu'en tant que cadre conceptuel, comme étant le résultat de l'intégration, ou plutôt de la fusion (« *fusion* »), de « deux 'traditions de recherche' très différentes » (« *two very different 'research traditions'* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 40). La première de ces deux traditions était celle que Mayr (1980a, 1982, 1998a) associait à ceux qu'il appelait les « biologistes expérimentaux » (« *experimental biologists* »), à savoir, pour la plupart, des généticiens physiologiques d'école mendélienne ou des généticiens des populations, alors que l'autre tradition était propre aux biologistes que ce dernier qualifiait de « naturalistes » (« *naturalists* »), et qui étaient surtout des zoologistes, des botanistes et des paléontologues (Mayr 1982, p. 540). Mayr (1980a, 1982, 1998a) considérait, en effet, que la redécouverte des travaux de Mendel (1866) au début du XX^e siècle, notamment à l'initiative de William Bateson (1902, 1909), avait abouti à une « aggravation de la scission » (« *widening split* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 6) entre les généticiens qui tâchaient de développer le modèle de transmission des caractères héréditaires qui était contenu dans ces mêmes travaux et les naturalistes-systématiciens qui prônaient les théories évolutives de Charles Darwin (1859) et d'Alfred Russel Wallace (1858, 1870). Plus précisément, écrivait-il, la plupart des « naturalistes évolutionnistes » (« *naturalist-evolutionists* ») qui ont contribué au développement de la biologie évolutive entre les années 1900 et le milieu des années 1930, tels David Starr Jordan (1895, 1898, 1905 ; Jordan & Kellogg 1907), Edward Bagnall Poulton (1896, 1904, 1908, 1909), Vernon L. Kellogg (Jordan & Kellogg 1907), Wilfred Hudson Osgood (1909), Henry Fairfield Osborn (1917, 1927, 1934), Frank Michler Chapman (1923), Erwin Stresemann (1926, 1936), Gladwyn Kingsley Noble (Noble & Jaekle 1928) et Franz Weidenreich (1929), « apprenaient la génétique à partir des écrits de ces généticiens qui écrivaient des ouvrages au sujet de l'évolution » (« *learned about genetics from the writings of those geneticists who wrote books about evolution* »), c'est-à-dire à partir des écrits de Bateson (1894, 1902, 1909, 1913) lui-

même, de Hugo de Vries (1901, 1903, 1906), de Thomas Hunt Morgan (1903, 1916, 1923, 1932 ; Morgan *et al.* 1915) et de Wilhelm Johannsen (1915, 1923), qui adoptaient, tous les quatre, une conception « essentialiste » (« *essentialist* »), et non pas « populationnelle », des espèces biologiques, ainsi qu’une vision de la « pression de mutation comme étant la principale force directrice de l’évolution » (« *mutation pressure as the major directive force in evolution* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 6). Par conséquent, ces mêmes naturalistes « rechignaient à conjuguer leurs propres résultats avec les nouveaux résultats de la génétique [*combine their own findings with the new findings of genetics*’], puisqu’ils avaient adopté une série de croyances traditionnelles au sujet de la nature de la variation et de l’hérédité [*a series of traditional beliefs in the nature of variation and inheritance*’] » qui contredisaient le modèle mendélien, mais qui « semblaient être cohérentes avec leurs propres observations » (« *seemed consistent with their own observations* ») et qu’ils considéraient être « mieux à même d’expliquer l’évolution » (« *better able to explain evolution* ») (Mayr 1980b ; 1998b, p. 123). C’est à partir du constat d’un tel décalage entre la manière dont les naturalistes évolutionnistes, d’un côté, et les généticiens mendéliens, de l’autre, envisageaient les relations entre la théorie de Darwin (1859) et les travaux de Mendel (1866) que Mayr (1980a, 1982, 1998a) pouvait donc en conclure que ces deux courants dans le domaine des sciences de la vie auraient constitué autant de traditions de recherche distinctes. Le terme « tradition de recherche » renvoie, en effet, à un concept que Mayr (1980a, 1982, 1998a) avait emprunté à Larry Laudan (1977). De son côté, ce dernier définissait une tradition de recherche comme étant

un ensemble de présupposés généraux au sujet des entités et des processus [*general assumptions about the entities and processes*] qui constituent un certain domaine d’études, ainsi qu’au sujet des méthodes appropriées [*appropriate methods*] qu’il faut utiliser pour examiner les problèmes et pour construire les théories [*for investigating the problems and constructing the theories*] qui concernent ce même domaine (Laudan 1977, p. 81)²⁸³.

²⁸³ Plus précisément, Laudan (1977) définissait les traditions de recherche comme étant des lignées généalogiques de « théories spécifiques » (« *specific theories* ») qui peuvent soit être contemporaines les unes des autres, soit se succéder les unes aux autres, et qui constituent, par conséquent, autant d’« exemplaires » (« *exemplars* ») des traditions desquelles elles relèvent. Ce qui relierait les différents exemplaires dont se constitue une seule et même tradition de recherche, ce seraient, toujours d’après Laudan (1977), « certains engagements métaphysiques et méthodologiques » (« *certain metaphysical and methodological commitments* ») qui permettraient d’« individualiser » (« *individuate* ») telle ou telle tradition et de la « distinguer » (« *disitnguish* »), par ce même biais, des autres (Laudan 1977, p. 78-79).

Mais en quoi auraient consisté, par conséquent, les présupposés généraux qui auraient caractérisé la tradition de recherche des biologistes expérimentaux (c'est-à-dire des généticiens mendéliens et, plus tardivement, des généticiens des populations), d'une part, et celle des naturalistes, d'autre part, du moins telles que les présentait Mayr (1980a, 1982, 1998a) ?

Tels que les décrivait ce dernier, les naturalistes évolutionnistes s'inscrivaient dans la droite ligne d'une tradition de recherche « darwinienne » (« *Darwinian* ») qui aurait consisté à « étudier les populations naturelles » (« *studying natural populations* ») « en prêtant une attention toute particulière au problème de l'origine de la diversité [du vivant] » (« *paying particular attention to the problem of the origin of diversity* ») (Mayr 1982, p. 452). Autrement dit, pour utiliser un autre concept qui a été introduit par Mayr (1975, 2006) lui-même, la tradition de recherche des naturalistes évolutionnistes était ancrée dans les présupposés que comportait une vision du monde organique qui a été qualifiée de « pensée populationnelle », d'après laquelle les êtres vivants se caractériseraient moins par les propriétés qu'ils partagent avec d'autres organismes, et qui nous permettent, ainsi, de les ranger dans un système de catégories taxonomiques, que par leur unicité, si bien que toute forme de catégorisation biologique s'opérerait « en termes purement statistiques » (« *only in statistical terms* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 326). Une telle conception du vivant implique, par conséquent, deux présupposés majeurs, qui sont, justement, l'un de nature ontologico-métaphysique et l'autre de nature méthodologique. D'un point de vue ontologique, il en découle que les seules « entités organiques » (« *organic entities* ») que l'on peut considérer comme étant « douées d'existence réelle » (« *have reality* ») sont les individus, c'est-à-dire les organismes considérés dans leur unicité, si bien que les espèces et les autres catégories taxonomiques ne seraient que des agrégats, situés à des niveaux d'intégration différents, de « populations dont nous ne pouvons déterminer que la moyenne arithmétique et les variations statistiques » (« *populations of which we can determine only the arithmetic mean and the statistics of variation* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 326). Contrairement aux individus qui les composent, ces différentes populations seraient donc « de simples abstractions statistiques » (« *merely statistical abstractions* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 326) qui n'auraient d'existence réelle que dans le périmètre de l'image que les biologistes se font du monde organique. C'est pour une telle raison que, d'un point de vue épistémologique, la conception du vivant qui caractérisait la tradition de recherche des naturalistes impliquait une approche qui privilégiait l'observation empirique et la description des phénomènes, éventuellement à l'aide d'outils statistiques tels que ceux qu'avait contribué à mettre au point le mathématicien belge Adolphe

Quetelet (1835, 1848)²⁸⁴, et dont les racines puisaient dans l’histoire naturelle telle qu’elle s’était constituée, comme discipline scientifique, entre la fin du XVII^e siècle et le milieu du XVIII^e. La théorie originaire de Darwin (1839, 1859), c’est-à-dire la théorie que Mayr (1980a, 1982, 1998a) lui-même indiquait comme étant le principal exemple paradigmatique de la méthodologie naturaliste-évolutionniste, s’inscrivait précisément dans cette tradition de recherche plus ancienne, qui était empreinte, comme l’a montré Jacques Roger (1989, 1995), d’une curiosité pour la diversité propre au monde vivant, ainsi que de la conviction que, avant de se livrer à des spéculations relatives aux causes des phénomènes observés, il était nécessaire d’en tracer l’histoire, et donc de les décrire afin de les ranger dans une classification qui se voulait le reflet d’un ordre naturel sous-jacent, c’est-à-dire une « classification naturelle » (Le Guyader 2018)²⁸⁵. L’originalité de Darwin (1859) relativement aux

²⁸⁴ Comme le remarquent Georges Canguilhem (1966) et Ian Hacking (1990), ayant étudié systématiquement les variations de la taille de l’homme dans des populations homogènes, Quetelet (1835, 1848) avait observé que de telles variations tendaient à se distribuer sur une courbe d’erreur gaussienne. Il en avait donc inféré que ces mêmes variations devaient être le résultat de l’influence d’une multiplicité de causes indépendantes, qui tendaient à se compenser mutuellement en ceci que d’aucunes étaient la cause de variations par excès, alors que d’autres étaient la cause de variations par défaut. Il en avait donc conclu qu’il devait exister un « type », déterminé par une norme divine, dont les individus s’écartaient à cause de variations aléatoires dont la probabilité était d’autant plus faible que leur ampleur était plus grande. De surcroît, un tel type devait exister dans la réalité, sous la forme d’un « homme typique », ou « homme moyen ». C’est à partir d’un tel présupposé que Quetelet (1835, 1848) a introduit la distinction entre la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur une population et leur moyenne gaussienne, ou médiane. Cette dernière se définit, plus précisément, comme étant la valeur qui sépare une distribution de mesures, par exemple la distribution de la taille des individus d’une population donnée, en deux moitiés, et donc comme la valeur correspondant à la variété la plus nombreuse parmi toutes les variétés homogènes – c’est-à-dire, par exemple, toutes les variétés dont les membres ont tous la même taille – dont se compose la population en question. Alors que, à son avis, la moyenne arithmétique était clairement une abstraction statistique, Quetelet (1835, 1848) considérait la moyenne gaussienne comme une quantité réelle. Ce faisant, ce dernier a ainsi contribué à transformer « la théorie de la mesure de quantités physiques inconnues, à une erreur probable bien définie près, [*the theory of measuring unknown physical quantities, with a definite probable error*] dans la théorie de la mesure de propriétés idéelles ou abstraites d’une population donnée [*the theory of measuring ideal or abstract properties of a population*]. Puisque ces dernières pouvaient être traitées à l’aide des mêmes techniques formelles [*the same formal techniques*] [que celles que l’on utilisait pour étudier les grandeurs physiques], elles devinrent des quantités réelles [*real quantities*]. Il s’agit ici d’une étape cruciale dans l’apprivoisement du hasard [*the taming of chance*]. Elle entama le processus de transformation de lois statistiques qui n’étaient rien d’autre que la description de régularités à grande échelle [*statistical laws that were merely descriptive of large-scale regularities*] en lois de la nature et de la société qui concernaient les vérités et les causes sous-jacentes à ces mêmes régularités [*laws of nature and society that dealt in underlying truths and causes*] » (Hacking 1990, p. 108).

²⁸⁵ « Au milieu du XVIII^e siècle, époque de Linné, les savants font une remarque essentielle : à chaque fois que ces systèmes ou méthodes [de classification] sont bien conduits, émergent les grandes familles de la botanique – comme les orchidacées, les liliacées, les poacées (nouveau nom des graminées), les brassicacées (nouveau nom des crucifères), les

naturalistes qui l'avaient précédé a consisté, par conséquent, en ceci que ce dernier a contribué à historiciser l'idée même de classification, en la mettant dans une perspective évolutive, et à y introduire, justement, une conception populationnelle des catégories taxonomiques. De plus, toujours chez Darwin (1859), une telle conception populationnelle allait de pair avec ce que l'on pourrait appeler une « vision statistique » de la sélection naturelle, d'après laquelle chaque organisme consiste dans un mosaïque de traits de caractère, ou traits phénotypiques, qui peuvent être, dans le contexte de « tel ou tel ensemble de conditions [de vie] » (« *a given set of conditions* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 328), sélectivement supérieurs ou inférieurs aux « traits phénotypiques moyens de la population » (« *the mean of the population* ») en question, si bien que « plus grand est le nombre de traits [sélectivement] supérieurs que possède un individu donné, plus grande est la probabilité que ce dernier ne parviendra pas seulement à survivre, mais également à se reproduire » (« *the greater the number of superior traits an individual has, the greater the probability that it will not only survive but also reproduce* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 328). En conséquence, ce sont précisément de telles innovations qui ont constitué l'acte de naissance de la tradition de recherche naturaliste-évolutionniste, du moins telle que la concevait Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a).

C'est ainsi que, à la pensée populationnelle qu'il associait à la tradition des naturalistes-évolutionnistes, Mayr (1975, 2006) opposait une autre vision du vivant, qu'il qualifiait de « pensée typologique » et qu'il faisait remonter jusqu'au concept platonicien d'« idée », ou « *eidos* » (Mayr 1975 ; 2006, p. 326). D'après une telle manière de penser le vivant, la diversité que l'on peut observer parmi les formes organiques ne serait rien d'autre qu'un épiphénomène, alors que la structure profonde du monde biologique consisterait dans un système de « types » (« *types* ») idéaux que l'on pourrait assimiler, justement, aux idées platoniciennes en ceci qu'ils constitueraient l'« essence » (« *essence* ») réelle de ces mêmes formes (Mayr 1959). Autrement dit, les « typologistes » (« *typologists* ») dont parlait Mayr (1975, 2006) envisageaient les différentes espèces d'objets, et notamment d'objets organiques, comme étant des types, au sens d'*eidoi*, qui existeraient toujours sous une double forme, de même que l'écrit Platon dans le *Timée* : d'une part, une « forme intelligible, qui reste la même, qui est inengendrée et indestructible [*ὁμολογητέον ἐν μὲν εἶναι τὸ κατὰ ταῦτα εἶδος..., ἀγέννητον καὶ ἀνώλεθρον*]', qui ne reçoit pas autre chose venant d'ailleurs en elle-même et

astéracées (nouveau nom des composées), les rosacées... De ce résultat, Linné et ses contemporains tirent une conclusion majeure. Si, en utilisant différents caractères et différentes logiques, on retrouve sans problème ces grandes familles de la botanique, n'y aurait-il pas *une seule* classification vers laquelle on tend ? Ne serait-ce que parce qu'on approcherait un ordre sous-jacent, la *classification naturelle*, qui refléterait l'ordre de la nature ? « La » renvoie à l'unicité qui, au XVIII^e siècle, est mise en relation avec l'ordre de la création divine. Cette unicité est immédiatement acceptée, mais, bien sûr, dans un contexte fixiste, créationniste » (Le Guyader 2018, p. 4).

qui elle-même n'entre en aucune autre chose où que ce soit, qui est invisible et ne peut être perçue par un autre sens [‘ἀόρατον δὲ καὶ ἄλλως ἀναίσθητον’] » ; d'autre part, « une seconde espèce qui porte le même nom que la première et qui lui ressemble, qui est perceptible par les sens, qui est engendrée, qui est toujours en mouvement, qui vient à l'être en un lieu quelconque pour en disparaître ensuite [‘τὸ δὲ ὁμώνυμον ὁμοίον τε ἐκείνῳ δεύτερον, αἰσθητόν, γεννητόν, πεφορημένον αἰεί, γιγνόμενόν τε ἐν τινι τόπῳ καὶ πάλιν ἐκεῖθεν ἀπολλύμενον’] » (Platon, *Timée*, 52a ; Brisson (2020), p. 2435-2346). Plus précisément, toujours tels que les présentait Mayr (1975, 2006), les naturalistes typologistes considéraient les plans d'organisation morphologique qu'avaient mis en évidence, au moyen du concept d'homologie, des botanistes et des zoologistes tels que, par exemple, Bernard de Jussieu, Antoine-Laurent de Jussieu, Étienne Geoffroy Saint-Hilaire et Georges Cuvier (Le Guyader 2018)²⁸⁶ comme étant des types biologiques intelligibles et immuables, alors qu'ils regardaient le « type moyen », au sens statistique du terme, de tel ou tel groupe d'organismes comme étant un type sensible, et donc destiné à changer sans cesse, au gré de la variation intra- ou interspécifique. Les naturalistes que Mayr (1975, 2006) qualifiait de « populationnistes » (« *populationists* ») s'opposaient, pour leur part, à une telle conception des espèces organiques en ceci qu'ils s'accordaient avec les typologistes pour considérer les types en tant que moyennes statistiques comme de simples abstractions dont on

²⁸⁶ Comme l'explique Hervé Le Guyader (2018), en effet, le concept même de « plan d'organisation » comme facteur déterminant de l'ordre naturel, et donc comme unité principale de la classification qui est censée le refléter, a émergé à partir des efforts d'identifier des critères permettant de rapprocher entre elles certaines espèces organiques, afin de les ranger dans un seul et même genre, ainsi que de rapprocher entre eux des genres donnés, afin de les ranger dans une seule et même famille, et ainsi de suite. Plus précisément, c'est en essayant d'identifier une hiérarchie de « caractères constants », un pour chaque niveau d'intégration du vivant, qui permettraient d'effectuer les rapprochements dont nous venons de parler que Bernard et Antoine-Laurent Jussieu ne parviennent pas seulement à distinguer la famille des plantes monocotylédones de celle des plantes dicotylédones – « d'après le nombre de cotylédons, les feuilles du germe dans la graine » –, mais ils « comprennent également que, pour définir les familles, le caractère clé est le *plan d'organisation* de la fleur. En effet, il existe une fleur de type 'orchidacée', une fleur de type 'labiacée', une fleur de type 'rosacée', etc. Il devient alors possible de décrire avec une bonne précision un certain ordre de la nature. À cette époque, on estime avoir enfin trouvé la méthode naturelle permettant d'accéder à la classification naturelle ». Par conséquent, c'est sur la base d'une telle intuition qu'Étienne Geoffroy Saint-Hilaire a pu formuler, par la suite, le concept d'homologie, dans la tentative de se servir de la méthode des deux Jussieu afin de définir un « plan d'organisation commun aux vertébrés » : « sont homologues des organes qui ont la même situation dans un plan d'organisation » (Hervé Le Guyader 2018, p. 5-6). Tel que le présente Le Guyader (2018), le processus historique que nous venons d'esquisser a donc fini par atteindre son apogée en 1798, lorsque, « généralisant à l'ensemble de la zoologie les concepts de plan d'organisation et d'homologie », Georges Cuvier « propose...une nouvelle classification du règne animal, où chacun des quatre embranchements est caractérisé par un plan d'organisation particulier : radiaires (*Radiata*), articulés (*Articulata*), mollusques (*Mollusca*), vertébrés (*Vertebrata*) » (Le Guyader 2018, p. 6).

pouvait se servir pour décrire une réalité biologique sous-jacente, mais qu'ils concevaient une telle réalité en termes de variations individuelles, et non pas de types idéaux. Par conséquent, c'est précisément pour une telle raison que Mayr (1975, 2006) pouvait en conclure que, « pour le typologiste, le type [en tant qu'*eidos*] est réel et la variation est une illusion, tandis que, pour le populationniste, le type [en tant que moyenne] est une abstraction et seulement la variation est réelle » (« *for the typologist, the type (eidos) is real and the variation an illusion, while for the populationist the type (average) is an abstraction and only the variation is real* ») (Mayr 1975 ; 2006, p. 327). Mais qui étaient donc ces biologistes typologistes que Mayr (1980a, 1982, 1998a) opposait aux naturalistes-évolutionnistes, en tant que biologistes populationnistes ?

Toujours d'après Mayr (1980a, 1982, 1998a), il ne s'agissait pas seulement des naturalistes pré-ou anti-darwiniens, mais également des généticiens mendéliens et des généticiens des populations dont le conflit avec les naturalistes-évolutionnistes se serait, justement, résolu dans le cadre de la Synthèse Moderne. Ce dernier plaçait, en effet, la tradition de recherche propre aux généticiens mendéliens « d'avant la Synthèse Moderne » (« *presynthesis* ») (Mayr 1982, p. 541) dans le contexte d'une conception des sciences de la vie qui s'était modelée sur les principes méthodologiques des sciences physiques et qui s'opposait aussi bien à ce qu'on pourrait appeler la « démarche spéculative » propre à la philosophie mécaniste du XVII^e siècle (Roger 1989) qu'à la démarche descriptive des naturalistes pré-darwiniens ou évolutionnistes, en ceci qu'elle accordait une place centrale aux expériences de laboratoire. En cela, Mayr (1982) rejoignait ainsi, en y renvoyant explicitement, les réflexions qu'un généticien mendélien tel que Thomas Hunt Morgan (1932) avait pu mener au sujet de ses propres recherches sur les phénomènes évolutifs. Dans la préface à un ouvrage consacré à « la base scientifique de l'évolution » (« *the scientific basis of evolution* »), Morgan (1932) écrit, en effet, que les avancées de la génétique dans les trois premières décennies du XX^e siècle auraient permis d'envisager l'évolution comme étant un phénomène qui se prêtait à « être étudié, de manière sérieuse, par le biais de méthodes expérimentales » (« *to be seriously studied by experimental methods* ») (Morgan 1932, p. 13), c'est-à-dire de méthodes qui auraient rendu possible « une discussion objective de la théorie de l'évolution, en contraste saisissant avec la méthode spéculative, plus ancienne, consistant à traiter l'évolution comme s'il s'agissait d'un problème historique » (« *an objective discussion of the theory of evolution in striking contrast to the older speculative method of treating evolution as a problem of history* ») (Morgan 1932, p. 13). Mais en quoi consistaient, plus précisément, ces méthodes expérimentales ? Pour répondre à une telle question, il suffit de prendre en considération les exemples que fournissait Morgan (1932) lui-même, à savoir les expériences sur « les mutations de l'onagre bisannuelle » (« *the mutations of evening primrose* ») que Hugo de Vries (1901) avait menées en 1900, ainsi que la théorie mutationniste de

l'évolution qu'il avait déduite d'une telle procédure expérimentale (de Vries 1901, 1903), les expériences sur la sélection de lignées pures (« *pure lines* ») de haricots qu'avait conduites Wilhelm Johannsen (1903), et qui lui avaient servi de fondement pour l'élaboration de sa propre théorie de la distinction entre génotype et phénotype (Johannsen 1909), ainsi que les expériences qui avaient permis de confirmer la théorie chromosomique de l'hérédité qu'avait proposée le médecin anglais William Sutton (1902, 1903) (Morgan 1932, p. 13). Il s'agissait, par conséquent, d'expériences qui avaient trait aux mutations de caractères phénotypiques que peuvent causer des variations génétiques, si bien que leur application à l'étude des phénomènes évolutifs comportait l'adoption de présupposés ontologico-métaphysiques au sujet de la nature de l'évolution en tant que processus, ainsi qu'au sujet des entités qui en font l'objet. Premièrement, elles comportaient une conception de l'évolution comme « évolution transformatrice » (« *transformational evolution* ») (Mayr 1982, p. 541), c'est-à-dire comme processus de réduction de la diversité du vivant, par la fixation d'une mutation génétique donnée, et non pas de production d'une telle diversité. Dans cette perspective, l'évolution procéderait, en tant que telle, par des sauts d'un type génétique à l'autre qui seraient causés, justement, par des mutations. Deuxièmement, de telles expériences impliquaient une conception de l'évolution comme processus qui ne concernerait que « des gènes et des caractères phénotypiques » (« *genes and characters* ») (Mayr 1982, p. 541), et non pas les populations, les espèces ou les autres *taxa* auxquels s'intéressaient, notamment, les naturalistes-évolutionnistes. C'est ainsi que les présupposés épistémologiques et méthodologiques qui caractérisaient la tradition de recherche des généticiens mendéliens, tels que les décrivaient Mayr (1982) et Morgan (1932), étaient étroitement liés à d'autres présupposés, de nature métaphysique et ontologique, qui correspondent à la manière dont Mayr (1975, 2006) lui-même caractérisait la conception du vivant qu'il qualifiait de « pensée typologique ». En conséquence, c'est précisément dans un tel système de présupposés que consistait ce qu'on peut appeler la « tradition de recherche » des généticiens mendéliens, que Mayr (1980a, 1982, 1998a) opposait, justement, à celle des naturalistes-évolutionnistes, telle que nous l'avons esquissée plus haut²⁸⁷. Mais de quelle manière ces deux traditions auraient-elles donc pu s'intégrer l'une à l'autre ?

La réponse que Mayr (1980a, 1982, 1998a) a apportée à une telle question consiste, avant tout, à mettre en valeur les « avancées accomplies par les naturalistes » (« *advances made by naturalists* »)

²⁸⁷ Comme le précisait Ernst Mayr (1982), les généticiens mendéliens d'avant la Synthèse Moderne mettaient l'accent « sur la transformation, et non pas sur la diversité » (« *on transformation, not on diversity* ») (Mayr 1982, p. 541). Par conséquent, c'était précisément « une telle méconnaissance totale de la diversité [*'total neglect of diversity'*] du vivant, ou, au mieux, son explication par l'invocation, en tant que *deus ex machina*, de mutations de Vriesiennes [*'de Vriesian mutations'*] ou des monstres prometteurs de Goldschmidt [*'Goldschmidt's hopeful monsters'*], qui laissait les naturalistes entièrement insatisfaits » (Mayr 1982, p. 541).

(Mayr 1980a ; 1998a, p. 32) sur trois problèmes fondamentaux, à savoir le problème de la nature des espèces biologiques, le problème des causes de la spéciation et celui du rapport entre microévolution et macroévolution. En ce qui concerne la nature des espèces, Mayr (1980a, 1982, 1998a) considérait, en effet, que le développement de la systématique évolutionniste entre la fin du XIX^e siècle et la fin des années 1930, et notamment l'apport de Karl Jordan (1896, 1905), aurait permis d'introduire un « concept d'espèce » (« *species concept* ») (Mayr 1942, 1955, 1957, 1963) de caractère purement populationnel, c'est-à-dire le « concept biologique d'espèce » (« *biological species concept* ») (Mayr 1942, 1955, 1957, 1963). Plus précisément, d'après une telle définition de ce que sont les espèces biologiques, ces dernières se définiraient sur la base des relations écologiques qu'entretiennent « des populations sympatriques qui n'appartiennent pas à la même espèce » (« *sympatric populations that do not belong to the same species* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 34), c'est-à-dire des relations qui se réduisent à un rapport de « non-croisement » (« *non-interbreeding* ») (Mayr 1955, p. 52)²⁸⁸. Quant aux causes de la spéciation, Mayr (1980a, 1982, 1998a) considérait qu'il était possible de rendre compte de l'impasse dans laquelle étaient finis des généticiens mendéliens tels de Vries (1889, 1906), Bateson (1894, 1902) et Goldschmidt (1940) par le fait que ces derniers s'étaient concentrés sur l'évolution en tant que produit des interactions entre gènes ou génotypes, sans prendre en considération les relations entre populations d'organismes. Ayant récusé la possibilité que la spéciation soit le résultat de l'action graduelle de la sélection naturelle, ces derniers avaient, en effet, été incapables de proposer un modèle explicatif alternatif, puisqu'ils n'avaient pas su reproduire en laboratoire l'émergence instantanée, par mutation, de variétés stériles issues de progéniteurs pleinement fertiles. Par conséquent, c'est en considérant la spéciation comme étant un phénomène inter-populationnel, et non pas « intra-populationnel » (« *intrapopulational* »), que les nouveaux systématiciens, tels que Bernhard Rensch (1929, 1933), Streseman (1936) et Mayr (1942) lui-même, auraient pu résoudre les problèmes que posaient les généticiens mendéliens, du moment que l'adoption d'un tel point de vue leur aurait permis de mettre en évidence le fait que « la spéciation consiste moins dans l'origine de nouveaux types [et notamment de nouveaux types génétiques] que dans celle de mécanismes de protection contre l'afflux de gènes étrangers dans les *pools* génétiques

²⁸⁸ « Le concept biologique d'espèce met l'accent sur la caractérisation de l'espèce comme étant une communauté de populations [*'species as a community of populations'*], sur l'isolement reproductif (souvent causé par de mécanismes comportementaux plutôt que par une simple barrière de stérilité) [*'reproductive isolation (often based on behavioral mechanisms rather than merely on a sterility barrier)'*], et sur les interactions écologiques [*'ecological interactions'*] entre populations sympatriques qui n'appartiennent pas à la même espèce. La principale propriété intrinsèque qui caractérise une espèce [*'the major intrinsic attribute characterizing a species'*] est l'ensemble de mécanismes d'isolement [*'isolating mechanisms'*] qui font en sorte qu'elle reste distincte d'autres espèces » (Mayr 1980a ; 1998a, p. 34).

[des populations en question] » (« *speciation is not so much the origin of new types but of protective devices against the inflow of alien genes into gene pools* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 36)²⁸⁹. En ce qui concerne le rapport entre phénomènes micro-évolutifs (c'est-à-dire les phénomènes évolutifs qui se produisent au niveau des populations et des espèces) et phénomènes macro-évolutifs (c'est-à-dire les phénomènes évolutifs qui se produisent au niveau des *taxa* supérieurs), Mayr (1980a, 1982, 1998a) estimait qu'une césure majeure s'était opérée au tournant des années 1940, alors que, jusqu'à cette époque-là, les taxonomistes, les morphologistes et les paléontologues qui s'étaient intéressés à l'histoire évolutive des genres et des autres *taxa* supérieurs avaient généralement adopté soit « une quelque sorte de finalisme orthogénétique » (« *some kind of orthogenetic finalism* »), soit « une quelque sorte de saltationnisme » (« *some kind of saltationism* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 36)²⁹⁰. Plus précisément, Mayr (1980a, 1982, 1998a) arguait du fait que les travaux de Huxley (1942), Rensch (1939, 1943, 1947) et Simpson (1944) avaient fini par démontrer que les avancées les plus récentes de la génétique impliquaient logiquement la compatibilité des phénomènes macro-évolutifs avec des causes (ou des mécanismes) micro-évolutives, si bien que l'on pouvait en conclure que « l'origine des catégories [taxonomiques] supérieures est un processus qui n'est rien d'autre qu'une extrapolation de la spéciation » (« *the origin of the higher categories is a process which is nothing but an extrapolation of speciation* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 38). Telles étaient donc, du moins aux yeux de Mayr (1980a, 1982, 1998a), les contributions que la tradition des naturalistes-évolutionnistes avait apportées à l'élaboration de la Synthèse Moderne en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie. Cela dit, quelle place auraient occupée, toujours d'après Mayr (1980a, 1982, 1998a), les contributions des généticiens mendéliens, ainsi que celles des généticiens des populations, dans un tel contexte ?

²⁸⁹ « Une nouvelle espèce se développe si une population qui est devenue géographiquement isolée de son espèce parentale [*a population which has become geographically isolated from its parental species*] acquiert, au cours de cette période d'isolement, des caractères qui favorisent ou qui assurent l'isolement reproducteur lorsque les barrières externes tombent [*characters which promote or guarantee reproductive isolation when the external barriers break down*] » (Mayr 1942, p. 155 ; cité par Mayr 1980a ; 1998a, p. 35).

²⁹⁰ « Si l'on avait demandé aux paléontologues, entre 1925 et 1935, pourquoi ils étaient de leur avis, les saltationnistes [*the saltationists*] auraient répondu qu'ils étaient tout simplement en train d'appliquer le mutationnisme de Vriesien à leur matière d'étude [*they were simply applying de Vriesian mutationism to their material*] et les orthogénétiens [*the orthogenesists*] auraient dit qu'ils voyaient partout les preuves d'une évolution adaptative progressive [*they found evidence everywhere for progressive adaptive evolution*] et que l'idée d'une évolution darwinienne par mutations accidentelles [*Darwinian evolution by accidental mutations*] était contredite par leurs découvertes » (Mayr 1980a ; 1998a, p. 36).

Les positions que Mayr (1959, 1980a, 1982, 1993, 1998a) a prises à ce sujet ont toujours consisté à relativiser le rôle qu’avaient joué la génétique mendélienne et la génétique des populations, dite « classique » (« *classical population genetics* ») (Mayr 1959)²⁹¹, dans l’élaboration de la théorie synthétique de l’évolution, à la fois en tant que théorie génétique de la sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie. En ce qui concerne les généticiens mendéliens – et notamment, encore une fois, Bateson (1894, 1902, 1909, 1913), de Vries (1901, 1903, 1906) et Johannsen (1903, 1909, 1915, 1923) –, Mayr (1980a, 1982, 1998a) maintenait que, dans la mesure où ils avaient continué à considérer l’évolution comme étant un phénomène purement génétique, ces derniers avaient constitué un obstacle à l’achèvement de la Synthèse Moderne. Pire encore, ils avaient « contribué, par le prestige de leurs écrits, à donner crédit à l’opinion que la théorie darwinienne de la sélection naturelle avait été réfutée » (« *contributed through the prestige of their writings to the opinion that Darwin’s theory of natural selection was refuted* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 30). Quant aux généticiens des populations qui avaient, en quelque sorte, pris le relai des mendéliens au cours des années 1920, tels Sewall Wright (1917a, 1931a, 1931b, 1932), R. A. Fisher (1918, 1930) et J. B. S. Haldane (1924-1932, 1932), Mayr (1959, 1980a, 1982, 1998a) reconnaissait le rôle que ces derniers avaient joué dans la pose des jalons de la théorie synthétique de l’évolution, mais il estimait, tout de même, que leur contribution se serait limitée à la restauration du « prestige de la sélection naturelle » (« *the prestige of natural selection* ») dans les rangs des généticiens, ainsi qu’à la mise au point d’outils pour le « traitement des caractères quantitatifs » (« *treatment of quantitative character* ») (Mayr 1959, p. 2). En effet, c’est précisément dans un tel but qu’ils avaient développé des modèles mathématiques des causes des phénomènes évolutifs qui se fondaient sur des « hypothèses simplificatrices » (« *simplifying assumptions* »), telle l’hypothèse que chaque gène posséderait « une valeur sélective absolue » (« *an absolute selective value* ») (Mayr 1959, p. 2). Mayr (1959) estimait, néanmoins, que de telles hypothèses relevaient d’une « simplification excessive et grossière » (« *gross oversimplification* ») de la complexité du changement évolutif, puisqu’elles le réduisaient, toujours aux yeux de ce dernier, à « un *input* ou un *output* de gènes, comme s’il s’agissait de mettre un certain nombre de haricots dans un sac et d’en retirer d’autres » (« *an input or output of genes, as the adding of certain beans to a beanbag and the withdrawing of others* ») (Mayr 1959, p. 2). C’est pourquoi Mayr (1959, 1980a, 1982, 1998a) mettait l’accent sur l’importance qu’avait

²⁹¹ Par « génétique des populations, dite ‘classique’ », nous entendons ici la branche théorique et mathématique de la génétique des populations dont les concepts et les méthodes sont enracinés dans les approches développées par Sewall Wright (1917a, 1931a, 1931b, 1932), R. A. Fisher (1918, 1930), J. B. S. Haldane (1924-1932, 1932) et Sergueï Tchvetverikov (1921, 1927 ; Tchvetverikov, Lerner & Parker 1961) entre les années 1920 et les années 1940. Voir, à ce sujet, Mayr (1959) et Plutynski (2004).

revêtue l'émergence de ce qu'il appelait « la nouvelle génétique des populations » (« *the newer population genetics* »), qui avait eu lieu entre le début des années 1910 et la fin des années 1930 (Mayr 1959, p. 2), c'est-à-dire en parallèle avec le développement de la génétique des populations dite « classique ». Plus précisément, il mettait en relation le renouveau d'une telle discipline avec l'avènement d'une génération de généticiens qui n'avaient pas été formés dans les laboratoires de génétique et de physiologie expérimentales, puisqu'ils provenaient des domaines de l'histoire naturelle et de l'élevage ou de l'horticulture, tels que Nils Herman Nilsson-Ehle (1908, 1909, 1911a, 1911b) en Suède, Herbert Spencer Jennings (1908, 1909, 1910, 1912, 1914, 1916, 1917 1935), Fernandus Payne (1909, 1918a, 1918b, 1920) Edward Murray East (1910, 1916, 1918), William E. Castle (1916, 1919 ; Castle & Phillips 1914 ; Castle & Wright 1915), Donald F. Jones (1917, 1919, 1924) et Francis B. Sumner (1918, 1932) aux États-Unis, Erwin Baur (1910, 1921, 1925, 1930) en Allemagne, ainsi que Sergueï Tchétverikov (1921, 1927 ; Tchétverikov, Lerner & Parker 1961) (Mayr 1982, p. 550), Nikolai Timofeïev-Ressovski (1926, 1927a, 1927b, 1939, 1940) (Mayr 1959, p. 2) et Theodosius Dobzhansky (1937) lui-même en Russie, avant que ce dernier n'émigrât aux États-Unis, en 1927, pour rejoindre le laboratoire de T. H. Morgan (Mayr 1998c, p. xii). Ces derniers auraient donc importé, dans le domaine de la génétique, la pensée populationnelle qu'avaient élaborée les naturalistes-évolutionnistes, ce qui les aurait amenés à concevoir les groupes d'organismes qu'ils étudiaient non plus comme étant des « agrégats de gènes indépendants qui apparaissent à différentes fréquences » (« *aggregates of independent genes in various frequencies* »), mais comme étant des « ensembles intégrés d'individus coadaptés » (« *integrated, coadapted complexes* ») qui sont porteurs de gènes dont la valeur sélective varie en fonction de leurs interactions avec les autres gènes auxquels ils sont associés dans le cadre de tel ou tel génotype, c'est-à-dire en fonction de leur « contexte génétique » (« *genetic background* »), ainsi que d'« une constellation de facteurs environnementaux » (« *constellation of environmental factors* ») (Mayr 1959, p. 2)²⁹². Ce faisant, ils

²⁹² Plus précisément, Mayr (1982) résumait aux sept affirmations suivantes les contributions fondamentales que cette nouvelle génétique des populations aurait apportées à la biologie de l'évolution : 1) « Il n'y a qu'une seule espèce de variation [*'only one kind of variation'*], puisque les mutations de grande ampleur [*'large mutations'*] et les très faibles variations individuelles [*'very slight individual variants'*] ne sont que deux extrêmes d'un seul et même gradient [*'a single gradient'*] » ; 2) « Les mutations ne sont pas toutes délétères [*'Not all mutations are deleterious'*] ; certaines sont neutres [*'neutral'*] et d'autres sont clairement bénéfiques [*'distinctively beneficial'*] » ; 3) « Le matériel génétique est, en lui-même, invariant (constant) [*'invariant (constant)'*], c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'hérédité molle [*'soft inheritance'*] » ; 4) « La recombinaison génétique [*'recombination'*] constitue la principale source de variation génétique dans les populations [*'the most important source of genetic variation in populations'*] » ; 5) « La variation phénotypique continue [*'continuous phenotypic variation'*] peut s'expliquer comme étant le résultat de facteurs multiples (de polygènes) [*'the result of multiple factors (polygenes)'*], ainsi que d'interactions épistatiques [*'epistatic interactions'*], et elle n'est pas en conflit

auraient définitivement réfuté l'« anti-sélectionnisme » (« *antiselectionism* ») et le « saltationnisme » (« *saltationism* ») (Mayr 1982, p. 551) des généticiens mendéliens qui les avaient précédés, dans la mesure où, comme nous l'avons anticipé plus haut, Mayr (1980a, 1982) estimait que ces deux thèses au sujet de l'évolution en tant que processus naturel étaient étroitement associées au présupposé que les gènes, et non pas les individus ou les populations, y occuperaient une place centrale.

En conséquence, nous pouvons en conclure que, aux yeux de Mayr (1959, 1980a, 1982, 1993, 1998a), la Synthèse Moderne se serait, avant tout, structurée autour du deuxième parmi les trois axes dont nous avons parlé plus haut, c'est-à-dire l'axe « gènes-organismes ». Mayr (1955, 1959, 1980a, 1982, 1998a) estimait, en effet, que l'abandon du présupposé de la centralité des gènes par les nouveaux généticiens des populations aurait constitué la condition de la possibilité même de l'émergence de la théorie synthétique de l'évolution par l'intégration de la tradition de recherche dans laquelle s'était historiquement située la discipline qui était propre à ces derniers et celle qui avait caractérisé les naturalistes-évolutionnistes. Plus précisément, il estimait que, tant que l'évolution avait été considérée comme un processus qui concernait, en premier lieu, les gènes, la vision darwinienne du vivant n'avait pas eu la moindre chance d'occuper l'espace théorique que définissaient les sciences de l'évolution à l'état naissant, y compris le long des autres axes problématiques que nous avons précédemment identifiés. En ce qui concerne l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs », toujours aux yeux de Mayr (1980a, 1982, 1998a), c'était précisément le réductionnisme des mendéliens qui leur avait empêché de reconnaître l'efficacité de la sélection naturelle, au profit d'une vision saltationniste, et plus précisément mutationniste, de l'évolution biologique. Quant à l'axe « microévolution-macroévolution », les thèses d'un paléontologue anti-darwinien, car saltationniste, tel qu'Otto Heinrich Schindewolf (1936) s'inspiraient explicitement du concept de « monstre prometteur » (« *hopeful monster* »), qui avait été forgé par le généticien Richard Goldschmidt (1933, 1940, 1960)²⁹³, et qui permettait, justement, de concevoir les phénomènes macro-évolutifs comme

avec l'hérédité particulière [*'not in conflict with particulate inheritance'*] » ; 6) « Un seul et même gène [*'A single gene'*] peut affecter plusieurs caractères [*'several characters'*] du phénotype correspondant (pléiotropie) [*'pleiotropy'*] » ; 7) « L'efficacité de la sélection naturelle [*'the effectiveness of selection'*] se démontre aussi bien par des données expérimentales que par des données observationnelles [*'experimental as well as observational data'*] » (Mayr 1982, p. 551). Il est intéressant de remarquer que Mayr (1982) omettait donc de mentionner toutes les contributions qui ont été apportées à l'élaboration de l'appareil mathématique de la génétique des populations, au sens large du terme, à partir de la fin des années 1930. Nous pouvons en conclure que Mayr (1982) associait étroitement le formalisme mathématique de la génétique des populations « *lato sensu* » à une conception génocentrique de l'évolution.

²⁹³ « Dans un précédent article (Goldschmidt 1933) j'ai utilisé le terme 'monstre prometteur' pour exprimer l'idée que les mutants qui produisent des monstruosité pourraient avoir joué un rôle considérable dans les processus macro-évolutifs [*'the idea that mutants producing monstrosities may have played a considerable role in macroevolution'*]. Une

n'étant pas une extension, ou plutôt une extrapolation, de phénomènes micro-évolutifs, mais comme étant le produit de macromutations entraînant des sauts évolutifs d'un plan d'organisation morphologique à un autre. C'étaient donc des exemples tels que celui-ci qui donnaient à Mayr (1980a, 1982, 1998a) l'occasion d'en conclure que le remplacement de la vision génétique de l'évolution qu'avaient traditionnellement défendue les généticiens mendéliens, ainsi que les généticiens des populations dits « classiques », par la conception populationnelle propre aux naturalistes-évolutionnistes avait fini par poser les jalons de la théorie synthétique telle qu'il l'envisageait lui-même, c'est-à-dire de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie où l'évolution était conçue comme étant un processus qui aurait pour objets non pas les gènes, mais les individus, en premier lieu, et les populations, par contrecoup, dont la cause principale serait la sélection naturelle (Huneman 2014)²⁹⁴ et dont les fondements matériels seraient solidement ancrés dans un niveau d'intégration micro-évolutif, c'est-à-dire le niveau intra-populationnel et intraspécifique. Il en découle que, dans le tableau de la Synthèse Moderne que brossait Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a), ce n'était pas la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel qui s'était bâtie sur la base de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, mais l'inverse. Nous pouvons donc nous servir de l'espace théorique tridimensionnel de la biologie évolutive que nous

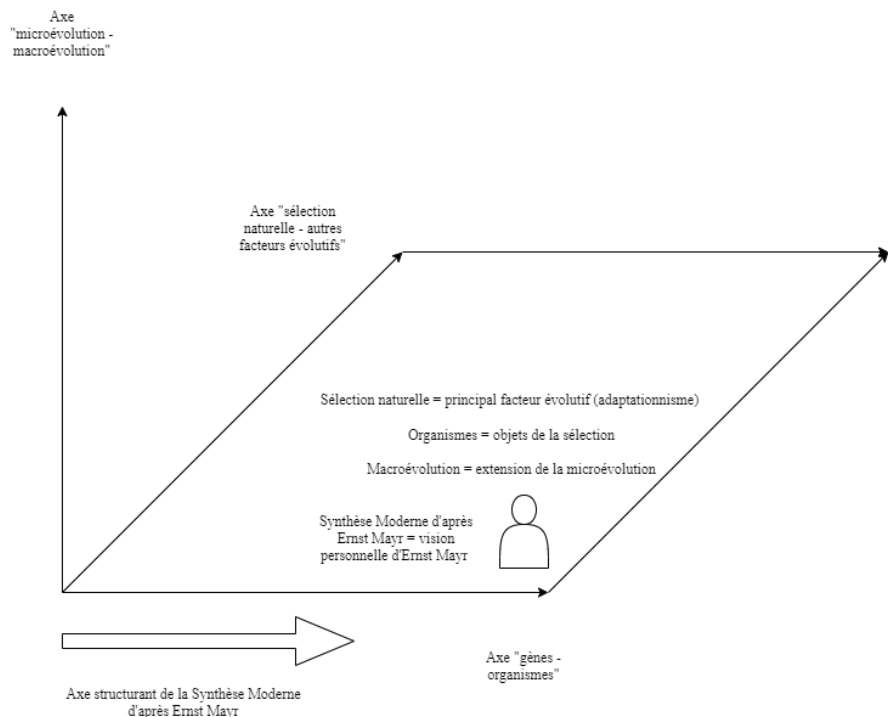


Figure 7 : Point de vue d'Ernst Mayr sur la Synthèse Moderne et sur l'évolution en tant que processus naturel

monstruosité apparaissant en une étape génétique unique [*in a single genetic step*] pourrait permettre l'occupation d'une nouvelle niche environnementale [*the occupation of a new environmental niche*] et produire, par ce même biais, un nouveau type en une seule et même étape [*produce a new type in one step*] (Goldschmidt 1940 ; 1960, p. 390). Pour plus de précisions à ce sujet, voir Schmitt (2000).

²⁹⁴ « D'aucuns, tels que, notoirement, Mayr, étaient prêts à accepter l'affirmation que la sélection naturelle constitue 'l'agent principal' [*the main agency*] de l'évolution, mais non pas l'idée que l'évolution est un changement de fréquences géniques [*evolution is a change in gene frequencies*] » (Huneman 2014, p. 164).

avons présenté plus haut – et notamment à la figure (6) – afin de représenter la façon dont Mayr (1980a, 1982, 1998a) concevait non seulement la Synthèse Moderne, mais également l'évolution comme processus naturel. Plus précisément, nous pouvons nous représenter le point de vue de Mayr (1980a, 1982, 1998a) au moyen du diagramme à la figure (7). D'après un tel point de vue, la Synthèse Moderne se serait donc développée le long de l'axe « gènes-organismes » et aurait fini par occuper une place qui correspond à la conjonction des thèses suivantes : (1) « la sélection naturelle constitue le principal facteur évolutif » ; (2) « les organismes représentent les véritables objets de la sélection naturelle » ; (3) « les grandes tendances macro-évolutives ne seraient rien d'autre qu'une extension de processus micro-évolutifs ».

Mayr (1955, 1959) était, en effet, persuadé que la théorie synthétique en tant que théorie génétique ne s'était véritablement constituée que lorsque les nouveaux généticiens des populations étaient parvenus à formuler une véritable « 'théorie de la relativité' génétique » (« *genetic 'theory of relativity'* ») (Mayr 1955, 1959), c'est-à-dire à introduire, dans leur propre domaine, la pensée populationnelle qui avait été articulée par la tradition de recherche des naturalistes-évolutionnistes. Cependant, les premiers avaient pu s'approprier une telle vision du vivant seulement après que les seconds avaient déjà posé les jalons pour l'élaboration de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel, à savoir la pensée populationnelle elle-même, une conception de la spéciation comme « spéciation géographique » (« *geographic speciation* »), ainsi que, justement, « une interprétation des événements macro-évolutifs...qui était entièrement cohérente avec les découvertes de la nouvelle génétique » (« *an interpretation of macroevolutionary events...that was fully consistent with the findings of the new genetics* ») (Mayr 1980a ; 1998a, p. 36-37). Par conséquent, c'est précisément en cela que la lecture de la Synthèse Moderne que nous a fournie Ernst Mayr (1980a, 1982, 1998a) nous permet de répondre aux deux questions que nous avons posées plus haut. Plus précisément, d'une part, elle nous permet d'émettre l'hypothèse que la théorie synthétique de l'évolution se serait structurée, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, autour de l'axe « gènes-organismes », grâce à l'élaboration de ce que Mayr (1975, 2006) appelait lui-même la « pensée populationnelle », dans la mesure où cette dernière aurait constitué la condition de possibilité afin que la vision darwinienne qu'incarnait la Synthèse Moderne se déploie également dans les deux autres dimensions de l'espace théorique des sciences évolutives que nous avons précédemment identifiées, c'est-à-dire le long de l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs », ainsi que le long de l'axe « microévolution-macroévolution ». D'autre part, elle nous permet également d'émettre l'hypothèse que la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ne se serait pas construite sur la base de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle : bien au contraire, elle en aurait constitué le fondement même, et non pas un

simple prolongement. En conséquence, nous pouvons également en conclure que, aux yeux de Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a), il n'y aurait eu, en fin de compte, qu'un seul et unique processus synthétique qui aurait abouti à l'établissement de la théorie synthétique de l'évolution, à la fois en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie et en tant que théorie génétique de l'évolution. Un tel processus aurait, néanmoins, consisté moins dans la fusion de la tradition de recherche des naturalistes-évolutionnistes et de celle des généticiens mendéliens ou des généticiens des populations, dits « classiques », que dans une véritable assimilation de la seconde à la première. Autrement dit, la tradition des naturalistes-évolutionnistes aurait servi de maquette pour la construction de la théorie synthétique de l'évolution, dans les deux acceptions du terme, alors que la tradition des généticiens n'aurait joué qu'un simple rôle ancillaire. Plus précisément, un tel rôle aurait consisté à résoudre des problèmes techniques relatifs à la confirmation empirique de certains aspects de la théorie synthétique de l'évolution, comme la question de la possibilité que des changements évolutifs majeurs soient effectivement la conséquence de pressions de sélection qui s'exerceraient sur des petites variations qui n'apporteraient qu'un avantage marginal aux individus qui les possèdent (Gayon 1992). Nous pouvons, en outre, émettre l'hypothèse que la place secondaire que Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a) attribuait aux modèles de la génétique (théorique) des populations dans le déroulement de la Synthèse Moderne s'inscrirait dans le contexte d'une stratégie visant à défendre la prééminence de la théorie de l'évolution, en tant que théorie des causes ultimes des propriétés organismiques, face à une double menace : d'une part, la menace que posait l'émergence de la biologie moléculaire « après la découverte de la structure de l'ADN en 1953 » (« *after the discovery of the structure of DNA in 1953* ») (Borges 2005, p. 952), en ceci que, pour emprunter les mots d'E. O. Wilson, elle forçait les biologistes non-moléculaires à « remettre en question [leur propre] légitimité intellectuelle » (« *rethink our intellectual legitimacy* ») (cité par Borges 2005, p. 952) ; d'autre part, les problèmes que soulevait l'élaboration d'une théorie non-darwinienne, car « neutre » (« *neutral* »), de l'évolution moléculaire (Kimura 1968 ; King & Jukes 1969) (Borges 2005, p. 953), dans la mesure où elle mettait à mal l'idée que la sélection naturelle constituerait le principal facteur évolutif à tous les niveaux d'intégration du vivant (au niveau biomoléculaire, au niveau micro-évolutif et au niveau macro-évolutif). En conséquence, nous pouvons avancer que ce serait précisément dans le but de sauver la place qu'il avait contribué à assigner à la théorie synthétique de l'évolution dans l'espace théorique que nous avons décrit plus haut que Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a) aurait essayé de relativiser l'importance de la génétique des populations, aussi bien « classique » que « moléculaire », au profit de celle de la « nouvelle systématique » (« *new systematics* ») évolutive (Huxley 1940 ; Mayr 1942).

Telles étaient donc les conclusions auxquelles était parvenu Mayr (1955, 1959, 1967, 1980a, 1982) au début des années 1980, mais qu'il a fini par reformuler de manière plus radicale au cours des

années 1990, en relativisant davantage les contributions que la génétique mendélienne et la génétique des populations, dite « classique », avaient apportées à la théorie synthétique de l'évolution. Pour ne citer qu'un exemple, dans la préface à la seconde édition du volume rassemblant des contributions issues des *workshops* qu'il avait contribué à organiser en 1974, Mayr (1998c) écrit que, bien que les participants au symposium qui s'était tenu à Princeton, en 1947, eussent eu l'impression que le camp des naturalistes-évolutionnistes et celui des biologistes expérimentaux, et donc des généticiens, avaient atteint un consensus durable, les seconds avaient persisté à considérer les gènes comme étant l'unité de sélection principale, alors que les premiers avaient continué à insister sur le fait que les unités de sélection étaient les individus en tant que totalités organiques. C'est pourquoi, à ses yeux, la Synthèse Moderne ne s'était effectivement achevée qu'au cours des années 1980, lorsque les généticiens avaient fini par abandonner l'hypothèse de la centralité des gènes, si bien que, une fois que la question de « l'objet de la sélection naturelle » (« *the object of selection* ») avait été résolue, il était devenu possible de considérer les autres différends qui persistaient entre les deux camps en question – notamment en ce qui concernait le niveau hiérarchique d'intégration auquel se produisent les phénomènes évolutifs et en ce qui concernait les dimensions en lesquelles se déroulent ces mêmes phénomènes – comme étant « des controverses internes au cadre de la synthèse » (« *controversies...within the synthesis* ») elle-même (Mayr 1998c, p. xiii). Cinq ans auparavant, en 1993, Mayr (1993) avait présenté la même thèse, d'une manière encore plus explicite, dans un article, intitulé « Qu'était la synthèse évolutive ? » (« *What Was the Evolutionary Synthesis ?* »), qui était consacré à une critique de l'interprétation de la Synthèse Moderne que venait d'esquisser Vassiliki B. Smocovitis (1992) et qu'elle approfondirait, par la suite, dans son ouvrage sur « l'unification de la biologie » (« *Unifying Biology* »), paru en 1996 (Smocovitis 1996). À cette autre occasion, Mayr (1993) avait, en effet, mis en valeur la nature hétérogène de la Synthèse Moderne, afin de montrer que la génétique, et notamment la génétique des populations dite « classique », n'y aurait occupé qu'une place marginale. Plus précisément, il avait affirmé que la Synthèse Moderne aurait consisté en trois synthèses distinctes : premièrement, « une synthèse de la pensée propre à trois disciplines biologiques majeures » (« *a synthesis of the thinking of three major biological disciplines* »), à savoir « la génétique, la systématique et la paléontologie » (« *genetics, systematics and paleontology* ») ; deuxièmement, « une synthèse entre une philosophie expérimentale et réductionniste (qui était plus forte parmi les généticiens) et une philosophie observationnelle et holiste (qui était plus forte parmi les naturalistes) » (« *a synthesis between an experimental-reductionist philosophy (strongest among the geneticists) and an observational-holistic philosophy (strongest among the naturalists)* ») (Mayr 1993, p. 31) ; troisièmement, une synthèse « entre une tradition anglophone, qui mettait l'accent sur les mathématiques et l'adaptation, et une tradition européenne continentale, qui mettait l'accent sur

les populations, les espèces et les *taxa* supérieurs » (« *between an anglophone tradition with emphasis on mathematics and adaptation and a continental European tradition with emphasis on populations, species and higher taxa* ») (Mayr 1993, p. 31).

Ce faisant, Mayr (1993) visait donc à critiquer l'argument que Smocovitis (1992) avait développé dans le sillage de son directeur de thèse, c'est-à-dire William B. Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001). D'après un tel argument, la Synthèse Moderne se serait constituée, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie (pour reprendre la distinction que nous avons tracée plus haut), au cours des années 1940 et 1950, sous l'impulsion de Julian Huxley (1942), d'une part, ainsi que par la mise en relation « du réseau qui s'était rassemblé autour de Dobzhansky » et du programme de recherche qu'avaient mis au point R. A. Fisher et Edmund Brisco Ford (1926, 1947) (« *the network that had coalesced around Dobzhansky...with Fisher and Ford* ») (Smocovitis 1992, p. 42), d'autre part. Ainsi interprétée, la théorie synthétique de l'évolution, toujours en tant que cadre conceptuel, se serait donc constituée dans le but de mener à bien le projet – à la fois intellectuel et éthico-politique – d'unification de l'ensemble hétéroclite des savoirs scientifiques qui avait été conçu, comme nous l'avons vu plus haut, au sein de la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique, mais que Smocovitis (1996) faisait remonter jusqu'aux « idéaux des Lumières » (« *Enlightenment ideals* ») (Smocovitis 1996, p. 152). Pour ce faire, les architectes de la théorie synthétique auraient fini par situer la biologie, elle-même envisagée comme étant une science unifiée, au cœur d'un tel projet, mais seulement dans la mesure où elle était « réductible au niveau du gène et soumise au principe axiomatique de l'équilibre de Hardy-Weinberg » (« *reducible to the level of the gene, and obeying the axiomatic Hardy-Weinberg Equilibrium Principle* ») (Smocovitis 1992, p. 42). Ce que Mayr (1993) reprochait à Smocovitis (1992), et donc également à Provine (1971, 2001), était, en conséquence, d'avoir accordé une place trop importante à la tradition anglophone qu'incarnaient les fondateurs de la génétique théorique des populations, en surestimant, par ce même biais, les contributions que les outils mathématiques qui relevaient d'une telle discipline avaient pu apporter au développement de la Synthèse Moderne. À son avis, la théorie synthétique de l'évolution aurait été le résultat de la confirmation empirique, dans le contexte du cadre théorique qu'avait bâti la tradition des naturalistes-évolutionnistes, des thèses fondamentales qui caractérisaient la « théorie de l'hérédité » (« *Theorie der Vererbung* ») d'August Weismann (1883, 1892) – à savoir la thèse que l'hérédité serait « dure » (« *hard inheritance* »), c'est-à-dire exempte de toute influence environnementale, et la thèse qu'elle serait de nature « particulaire » (« *particulate* »), c'est-à-dire qu'elle consisterait dans la transmission de facteurs héréditaires discrets, et non pas dans le mélange des caractères parentaux (Mayr 1993, p. 31). Dans une telle perspective, le rôle des mathématiques, et donc de la génétique des populations dite « classique », ou « théorique », se serait limité à la tâche,

pour ainsi dire, « secondaire » de mettre en lumière les aspects de ce même cadre qui nécessitaient de recueillir davantage de données afin qu'on pût les considérer comme ayant été factuellement corroborés, tels que, par exemple, l'idée que de petites variations possédant un avantage sélectif qui était, somme toute, limité pouvaient s'accumuler, au fil du temps, au sein d'une population donnée, jusqu'à en changer le profil phénotypique et génotypique²⁹⁵.

De plus, comme nous venons de l'anticiper plus haut, la manière dont Mayr (1955, 1959, 1967, 1980a, 1982, 1993, 1998) interprétait la théorie synthétique – aussi bien comme théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle que comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie – et le processus historique qui l'avait produite s'opposait également à la lecture qu'en avait donnée Stephen Jay Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), notamment telle qu'elle est présentée dans l'ouvrage, paru posthume en 2002, que ce dernier a écrit au sujet de « la structure de la théorie de l'évolution » (« *the structure of evolutionary theory* ») (Gould 2002). En faisant explicitement référence à la biographie que Provine (1986) avait consacrée à Sewall Wright, Gould (2002) écrivait, en effet, qu'il était possible d'identifier deux « phases » (« *phases* ») dans la Synthèse Moderne, en tant que processus historique. Il affirmait, en outre, que, dans ces deux phases, les modèles mathématiques des généticiens des populations « classiques » auraient joué autant de rôles clés différents, qu'il était donc nécessaire de distinguer (Gould 2002, p. 504). Dans une telle perspective, la « première phase » (« *first phase* ») de la synthèse aurait ainsi consisté à faire « une synthèse de Mendel et de Darwin » (« *a synthesis of Mendel and Darwin* »), qui se serait accomplie, comme l'expliquait Julian Huxley (1942), en « trois étapes majeures » (« *three major steps* ») : premièrement, la « constatation » (« *recognition* ») de l'universalité des « principes mendéliens » (« *Mendelian principles* ») dans le

²⁹⁵ Il faut, néanmoins, rappeler qu'une telle appréciation du rôle qu'avait joué la génétique des populations, dite « classique », dans le cadre de la Synthèse Moderne était déjà présente, en germe, dans une communication que Mayr (1959) avait lui-même présentée, en 1959, à l'un des symposiums des laboratoires de Cold Spring Harbor : « Il me semble que l'importance primordiale [*'main importance'*] de la théorie mathématique [qu'avaient développée les généticiens des populations dits 'classiques'] a consisté en ceci qu'elle a apporté de la rigueur mathématique [*'mathematical rigor'*] à des affirmations qualitatives [*'qualitative statements'*] qui avaient déjà été faites depuis longtemps. Il était important de comprendre et de démontrer mathématiquement en quoi un avantage sélectif, aussi minime fût-il, pouvait amener à la diffusion d'un certain gène au sein d'une population donnée [*'It was important to realize and to demonstrate mathematically how slight a selective advantage could lead to the spread of a gene in a population'*]. Le plus grand service que la théorie mathématique ait rendu à la théorie synthétique a peut-être consisté en ceci que, de manière subtile [*'in a subtle way'*], elle a changé la manière d'envisager les facteurs génétiques et les événements génétiques dans le contexte de l'évolution [*'the mode of thinking about genetic factors and genetic events in evolution'*] sans nécessairement apporter des contributions qui brillaient par leur originalité [*'without necessarily making any startlingly novel contributions'*] (Mayr 1959, p. 2).

monde vivant ; deuxièmement, « la découverte fondamentale » (« *key insight* ») du fait que « la variabilité...continue et à petite échelle » (« *small scale, continuous...variability* ») à laquelle faisait allusion Darwin (1859, 1868) était compatible avec des processus de transmission héréditaire de type mendélien ; troisièmement, comme nous venons de l'évoquer, « la preuve mathématique du fait que de faibles pressions de sélection qui agissent sur des différences génétiques mineures peuvent amorcer le changement évolutif » (« *the mathematical demonstration that small selection pressures acting on minor genetic differences can render evolutionary change* ») (Gould 2002, p. 504). En conséquence, poursuivait Gould (2002), ce serait précisément à l'issue de ces trois étapes qu'auraient émergé les modèles de la génétique des populations, dite « classique », dont la fonction aurait consisté, à cette étape-là, à « contraindre » (« *constriction* ») (Provine 1986, 1989), ou à « restreindre » (« *restriction* ») (Gould 2002), l'éventail des mécanismes évolutifs dont il était, pour ainsi dire, « épistémologiquement admissible » de postuler l'existence (Gould 2002, p. 506). Quant à la « seconde phase » (« *second phase* ») de la Synthèse Moderne, elle aurait consisté, toujours d'après la reconstruction qu'en faisait Gould (2002), à faire une synthèse de plusieurs « sous-disciplines traditionnelles de la biologie » (« *traditional subdisciplines in biology* »), telles que la génétique elle-même – sous la forme d'une génétique des populations naturelles – (Dobzhansky 1937), la systématique (Mayr 1942), la paléontologie (Simpson 1944), la cytologie (White 1945), la morphologie (Rensch 1947) et la botanique (Stebbins 1950), en les « mettant en relation...avec le noyau théorique qui avait été forgé au cours de la première phase » (« *linking...to the core theory forged during the first phase* ») (Gould 2002, p. 504).

La fonction qu'auraient jouée les modèles de la génétique des populations, dite « classique », dans cette autre phase de la Synthèse Moderne aurait donc consisté à fournir, justement, un « cadre » (« *framework* ») pour l'unification de ces différents domaines des sciences de la vie. Ce dernier ne se serait, cependant, pas matérialisé sous la forme d'une véritable théorie mathématique unifiée des phénomènes biologiques, en tant que phénomènes évolutifs, mais sous la forme d'« une puissante culture qui était partagée parmi les biologistes évolutionnistes » (« *a powerful shared culture among evolutionists* »), c'est-à-dire d'« un ensemble de présupposés qui étaient acceptés sans qu'on les questionne à un niveau plus fondamental ou que l'on ressente la nécessité d'en saisir la mécanique sous-jacente » (« *a set of assumptions accepted without fundamental questioning or perceived need to grasp the underlying mechanics* ») (Gould 2002, p. 520). Plus précisément, alors que la première phase de la Synthèse Moderne s'était caractérisée par une attitude « pluraliste » (« *pluralism* ») au sujet des possibles causes de l'évolution, dans la mesure où elles étaient « cohérentes avec la génétique [mendélienne] » (« *coherent with genetics* ») (Gould 2002, p. 505) – et notamment au sujet des relations entre la sélection naturelle et la dérive génétique, ou « d'autres phénomènes aléatoires »

(« *other random phenomena* ») (Gould 2002, p. 505) –, l'autre phase aurait vu l'émergence progressive d'une conception de l'évolution qui se fondait sur ce que Gould (2002) appelait, en s'inspirant de Weismann (1868, 1875, 1876, 1909), la « 'toute-suffisance' de la sélection naturelle » (« '*all-sufficiency*' of natural selection ») (Gould 2002, p. 505). Il s'agissait, par conséquent, d'une conception d'après laquelle les organismes étaient vus comme étant « des boules de billard qui roulent, sans entraves, là où les a envoyées la queue de billard de la sélection naturelle, sur la table encombrée de l'écologie » (« *unfettered billiard balls, rolling wherever the pool cue of natural selection dictated upon the crowded table of ecology* ») (Gould 2002, p. 505). C'est pourquoi Gould (1983, 2002) pouvait donc en conclure, encore une fois en accord avec Provine (1986, 1989)²⁹⁶, que les modèles de la génétique des populations, dite « classique », auraient continué de revêtir un rôle central jusque dans la seconde phase de la Synthèse Moderne, quoique cet autre rôle n'ait pas consisté tout simplement à consolider la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel, mais également à la « durcir » (« *hardening* ») autour d'un ensemble de présupposés que l'on pourrait qualifier d'« adaptationnistes » (« *adaptationist* ») (Gould & Lewontin 1979)²⁹⁷. Cela dit, en quoi consistent, concrètement, de tels modèles ? De quelle manière auraient-ils joué, en deux phases successives, les deux rôles dans l'élaboration de la théorie synthétique de l'évolution, dans les

²⁹⁶ « Mon analyse corrobore la thèse de Stephen Jay Gould, d'après laquelle la synthèse évolutive s'est 'endurcie' au cours des années 1940 et du début des années 1950 [*'Stephen Jay Gould's thesis that the evolutionary synthesis 'hardened' during the 1940s and early 1950s'*], par quoi il entend que la sélection naturelle est devenue ce que l'on considère comme étant de loin le mécanisme dominant de l'évolution [*'natural selection came to be viewed as the highly dominant mechanism of evolution'*] [(Gould 1980a, 1983, Gould & Eldredge 1982)]. La conséquence en a été que les biologistes ont commencé à envisager le processus évolutif comme étant exclusivement adaptatif, plutôt que non-adaptatif, même aux niveaux taxonomiques les plus bas [*'biologists viewed the evolutionary process as almost exclusively adaptive rather than nonadaptive, even at the lowest taxonomic levels'*]. Cela a représenté, pour Dobzhansky et pour Wright, ainsi que pour beaucoup d'autres évolutionnistes éminents, un changement d'attitude significatif dans le domaine de la systématique [*'a significant change in attitude in the field of systematics'*] » (Provine 1986, p. 404).

²⁹⁷ Tel que le définissaient, entre autres, Stephen Jay Gould et Richard Lewontin (1979), le terme « adaptationnisme » renvoie à « une famille de positions au sujet de l'importance de la sélection naturelle [*'views about the importance of natural selection'*] dans l'évolution des organismes, dans la construction d'explications pour les phénomènes évolutifs et dans la définition du but des études sur l'évolution [*'defining the goal of research on evolution'*]. Les partisans de l'adaptationnisme, ou 'adaptationnistes', considèrent la sélection naturelle parmi les individus d'une population donnée comme étant la seule cause importante de l'évolution de tel ou tel trait [*'view natural selection among individuals within a population as the only important cause of the evolution of a trait'*]. Typiquement, ils croient également que la construction d'explications qui reposent uniquement sur la sélection naturelle constitue la manière la plus féconde de faire avancer la biologie de l'évolution et que cette démarche répond à l'objectif le plus important de la biologie évolutive, qui consiste à comprendre l'évolution des adaptations [*'this endeavor addresses the most important goal of evolutionary biology, which is to understand the evolution of adaptations'*] » (Orzack 2010).

différentes acceptions du terme que nous avons définies plus haut, que leur attribuaient Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) ? De plus, en quoi la manière dont ces derniers présentaient la fonction de ces mêmes modèles mathématiques dans le cadre de la théorie synthétique de l'évolution, par opposition à la reconstruction qu'en avait proposée Ernst Mayr (1955, 1959, 1967, 1980a, 1982), nous permettrait-elle de répondre aux deux questions que nous avons posées plus haut, qui sont, nous le rappelons, la question de savoir si la Synthèse Moderne se serait effectivement déployée le long des trois axes thématiques que nous avons identifiés et celle de savoir si l'on pourrait caractériser la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel comme étant une extension de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle ?

1.1.2 Une synthèse « bachelardienne » : la génétique des populations, dite « classique » comme fondement d'une théorie génétique de l'évolution et noyau du cadre conceptuel de la théorie synthétique

Afin de répondre à de telles questions, nous pouvons partir d'un article datant de 1977, et consacré au « rôle de la génétique mathématique des populations dans la synthèse évolutive des années 1930 et 1940 » (« *role of mathematical population genetics in the evolutionary synthesis of the 1930's and 40's* ») (Provine 1977), dans lequel Provine (1977) ne se limite pas à reconstruire les thèses que Mayr (1955, 1959, 1967) avait précédemment défendues au sujet des relations entre la génétique mendélienne du début du XX^e siècle, la génétique des populations, dite « classique », et la « nouvelle génétique des populations », mais il les réfute sur deux points fondamentaux. Premièrement, il replace ces mêmes thèses dans leur contexte historique, en les rapprochant des critiques que le biologiste du développement britannique Conrad Hal Waddington (1957) avait lui-même adressées à la conception de l'évolution qu'impliquent les modèles mathématiques de la génétique des populations dite « classique »²⁹⁸, ainsi qu'en évoquant les positions, diamétralement opposées, que d'autres

²⁹⁸ Tout comme Mayr (1955, 1959), Waddington (1957, 2014) distinguait, en effet, deux approches de la théorie synthétique de l'évolution lorsqu'elle était conçue comme étant une tentative de « résoudre » le problème de l'évolution (Dalcq 1951) d'un point de vue génétique : d'une part, celle des « théoriciens mathématiques » (« *mathematical theorists* »), c'est-à-dire des généticiens des populations théoriques ou « classiques » tels Fisher (1930), Wright (1931a, 1931b, 1932) et Haldane (1932) ; d'autre part, celle des « naturalistes expérimentaux » (« *experimental naturalists* ») (Waddington 1957 ; 2014, p. 59), c'est-à-dire de ceux que Mayr (1959) appelait les « nouveaux généticiens des populations ». De plus, alors qu'il mettait en valeur la « série de recherches approfondies et pénétrantes » (« *extensive and penetrating series of researches* ») qu'avaient menée les seconds, il considérait que les résultats obtenus par les

architectes de la théorie synthétiques de l'évolution, tels que Theodosius Dobzhansky (1955), avaient exprimées à ce même sujet²⁹⁹. Deuxièmement, il critique le présupposé même de la reconstruction de la Synthèse Moderne, en tant que processus historique, qu'avait fournie Mayr (1955, 1959, 1967), c'est-à-dire l'idée que l'émergence de ce que ce dernier appelait la « nouvelle génétique des populations » aurait rendu possible l'assimilation de la tradition de recherche qui était propre aux généticiens mendéliens, ainsi qu'aux généticiens des populations « classiques », par la tradition de recherche qui caractérisait les naturalistes-évolutionnistes. Plus précisément, Provine (1971, 1977, 2001) considérait que, bien que les travaux de généticiens tels Charles Benedict Davenport (1905, 1906, 1910, 1912), Jennings (1908, 1909, 1910, 1912, 1914, 1916, 1917, 1935), Baur (1910, 1921, 1925, 1930), East (1910, 1916, 1918), Castle (1916, 1919 ; Castle & Phillips 1914 ; Castle & Wright 1915) et Alfred Henry Sturtevant (1918), voire T. H. Morgan (1903, 1915, 1916, 1923, 1932) lui-

premiers n'avaient eu qu'une influence limitée sur l'avancement de la biologie de l'évolution. Plus précisément, il écrivait que, si l'on considérait ce qu'était devenue une telle théorie mathématique après la période de temps comprise entre 1924 et 1932, l'on pouvait s'apercevoir qu'« elle n'a atteint aucun des deux résultats que l'on attend normalement d'une théorie mathématique [*it did not achieve either of the two results which one normally expects from a mathematical theory*'] ». En premier lieu, elle n'a conduit à aucun énoncé quantitatif remarquable au sujet de l'évolution [*any noteworthy quantitative statements about evolution*']. Les formules [des modèles de la génétique des populations] impliquent des paramètres qui représentent l'avantage sélectif, la dimension effective d'une population, les taux de migration et de mutation, etc. [*parameters of selective advantage, effective population size, migration and mutation rates, etc.*'], c'est-à-dire des paramètres dont les valeurs sont, pour la plupart, connues de manière encore trop imprécise pour qu'ils permettent de formuler ou de vérifier des prédictions quantitatives [*most of which are still too inaccurately known to enable quantitative predictions to be made or verified*']. Mais même lorsque cela n'est pas possible, un traitement mathématique [de phénomènes empiriques] peut toujours révéler de nouveaux types de relations et de processus, et permettre ainsi de formuler une théorie plus souple, capable d'expliquer des phénomènes qui étaient auparavant méconnus [*a mathematical treatment may reveal new types of relation and of process, and thus provide a more flexible theory, capable of explaining phenomena which were previously obscure*']. On peut douter de la mesure dans laquelle la théorie mathématique de l'évolution a permis d'atteindre cet objectif. Très peu d'idées qualitativement nouvelles en ont émergé [*It is doubtful how far the mathematical theory of evolution can be said to have done this. Very few qualitatively new ideas have emerged from it*'] » (Waddington 1957 ; 2014, p 59-60).

²⁹⁹ « Les fondements de la génétique des populations ont été jetés principalement au moyen de déductions mathématiques à partir de prémisses élémentaires [*chiefly by mathematical deduction from basic premises*'] qui sont contenues dans les travaux de Mendel et de Morgan, ainsi que de leurs successeurs. Haldane, Wright et Fisher sont les pionniers de la génétique des populations, dont les principaux équipements de recherche [*whose main research equipment*'] ont été du papier et de l'encre, plutôt que des microscopes et des champs expérimentaux, des tubes à drosophiles ou des cages à souris. C'est de la biologie théorique au plus haut point, et elle a servi de guide pour effectuer des expériences et des observations quantitatives rigoureuses [*This is theoretical biology at its best, and it has provided a guiding light for rigorous quantitative experiment and observation*'] » (Dobzhansky 1955, p. 14 ; cité par Provine 1977, p. 3).

même, eussent permis de démontrer, au plus tard avant l'an 1918, que « le mendélisme et le darwinisme étaient, de manière générale, complémentaires » (« *in a general way Mendelism and Darwinism were complementary* ») (Provine 1977, p. 7), ces derniers n'avaient su fournir aucune preuve définitive du fait que les « petites variations mendéliennes » (« *small Mendelian variations* ») (Provine 1977, p. 7) qui correspondaient aux « différences individuelles » (« *individual differences* ») que Darwin (1859) avait identifiées comme étant la matière première nécessaire à la sélection naturelle pouvaient effectivement servir de levier pour amorcer un processus de sélection différentielle non seulement dans les populations expérimentales qu'étudiaient ces mêmes généticiens, mais également dans les populations naturelles. C'est pour une telle raison que, poursuivait Provine (1977), la plupart des naturalistes avaient fini par ignorer en bloc les contributions des généticiens, à l'exception notable de Julian Huxley (1940 ; Huxley & Haldane 1927). En conséquence, Provine (1977) pouvait en conclure que la synthèse entre la génétique mendélienne et la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle, telle qu'elle avait été développée par les naturalistes-évolutionnistes, au cours des deux premières décennies du XX^e siècle, aurait découlé de l'« analyse théorique quantitative des conséquences de l'hérédité mendélienne par rapport à la sélection naturelle et à d'autres processus évolutifs » (« *quantitative theoretical analysis of the consequences of Mendelian heredity in relation to selection and other evolutionary processes* ») qu'avaient conduite des généticiens des populations « classiques » comme Wright (1916, 1917a, 1917b, 1918, 1920, 1921a, 1921b, 1922, 1923a, 1923b, 1929, 1930, 1931a, 1931b, 1932, 1933, 1937a, 1937b), Fisher (1918, 1922, 1927, 1928, 1930 ; Fisher & Ford 1926), Haldane (1919a, 1919b, 1924-1932, 1929, 1930, 1932) et Tchetverikov (1921, 1927 ; Tchetverikov, Lerner & Parker 1961). Plus précisément, une telle analyse aurait été menée, poursuivait Provine (1977), non seulement sur la base des avancées faites par ceux que Mayr (1959) appelait « les nouveaux généticiens des populations », mais également, et avant toute chose, par l'intermédiaire de « modèles mathématiques du changement génétique dans les populations d'organismes » (« *mathematical models for genetic change in populations of organisms* ») (Provine 1977, p. 7)³⁰⁰.

³⁰⁰ Plus précisément, comme l'observait, encore une fois, Provine (1971, 2001) lui-même, ces modèles étaient étroitement liés à « trois développements » (« *three developments* ») (Provine 1971 ; 2001, p. 131) dans l'étude des conséquences mathématiques des lois de Mendel (1866) qui avaient eu lieu avant 1918. Premièrement, « le principe de l'équilibre de Hardy-Weinberg » (« *the...Hardy-Weinberg equilibrium principle* »), qui avait permis d'identifier les conditions sous lesquelles « la variabilité était préservée dans des populations mendéliennes qui se reproduisent de manière aléatoire » (« *variability was preserved in random breeding Mendelian populations* »). Deuxièmement, « le travail sur les conséquences mathématiques de l'endogamie [*work on the mathematical consequences of inbreeding*] qui avait été mené, principalement, aux États-Unis ». Troisièmement, l'analyse des « conséquences mathématiques de la sélection naturelle sous différentes hypothèses sur la constitution de telle ou telle population » (« *mathematical consequences of*

Il faut, en effet, rappeler que, dans sa forme originale, la théorie de Darwin (1859, 1860, 1861, 1866) présentait des faiblesses majeures. L'une de telles faiblesses résidait précisément dans la manière où Darwin concevait la relation qui existe entre la sélection naturelle et les mécanismes de transmission des caractères héréditaires. Plus précisément, comme l'on peut en déduire de la manière dont Provine (1971, 2001) lui-même présentait les thèses de Darwin (1859, 1860, 1861, 1866) à un tel sujet, ces dernières reposaient sur l'idée que le changement évolutif serait le résultat de l'interaction entre deux forces opposées : d'une part, la plasticité de la structure des organismes, qui causerait, au gré des variations environnementales, l'apparition de petites variations héréditaires, dont l'accumulation d'une génération à l'autre constituerait un puissant vecteur de changement ; d'autre part, le mécanisme par lequel les enfants héritent les caractères de leurs parents, qui consistait, aussi bien pour Darwin (1859, 1860, 1861, 1866) que pour la plupart de ses contemporains, dans le mélange de tels caractères comme conséquence des mécanismes de reproduction sexuée³⁰¹. Ces deux facteurs seraient donc opposés en ceci que la plasticité des organismes favoriserait l'apparition et l'accumulation de nouvelles variations, alors que le mélange des caractères parentaux finirait par diluer l'intensité des variations que l'on peut observer chez les différents parents, lorsqu'elles sont transmises à leur progéniture, en garantissant ainsi une certaine uniformité de l'espèce. Une telle contradiction a été relevée de manière explicite par l'ingénieur écossais Henry Charles Fleeming Jenkin (1867), lorsqu'il a écrit une recension de *l'Origine des espèces*, parue en 1867, dans la *North British Review*. Plus précisément, dans cette recension, Fleeming Jenkin (1867) oppose à la théorie darwinienne de l'évolution par la sélection et l'accumulation graduelle de petites variations individuelles ce qu'on appelle communément l'« argument de la submersion » (« *swamping argument* ») (Bowler 2003), c'est-à-dire l'objection d'après laquelle aucune variation de grande ampleur, même la plus favorable, ne pourrait jamais altérer le « type moyen » de l'espèce (au sens

selection under a variety of assumptions about the constitution of the population ») qui avait été conduite par le mathématicien H. T. J. Norton (Provine 1971 ; 2001, p. 131).

³⁰¹ « Par conséquent, pour Darwin, la reproduction sexuée était un agent d'uniformité, et non pas de diversité [*'an agent of uniformity, not diversity'*]. Il croyait qu'il y avait plus de variation [*'more variation'*] chez les organismes qui se reproduisaient sexuellement [*'sexually reproducing organisms'*] que chez ceux qui se reproduisaient asexuellement. Si cela n'avait pas été le cas, les organismes qui se reproduisaient asexuellement [*'asexually reproducing organisms'*] n'auraient pas été en mesure de présenter l'uniformité qu'observaient tous les naturalistes [*'be able to exhibit the uniformity all naturalists observed'*]. Darwin pensait que la reproduction sexuée était, en fait, plus répandue que ne le pensaient ses contemporains, et cela en raison de la vigueur qu'elle dégageait, à certaines conditions, dans la progéniture [*'because of the vigor it unleashed in the offspring under certain conditions'*]. Il en découlait que la variation, l'aliment de la sélection naturelle [*'fodder for natural selection'*], était également plus répandue qu'on ne le pensait, mais qu'elle était maîtrisée par le croisement des sexes [*'kept in check by interbreeding'*] » (Provine 1971 ; 2001, p. 6-7).

d'Adolphe Quetelet (1835, 1848), et donc comme ensemble des traits moyens – par rapport à une distribution des fréquences supposément normale – d'une population donnée), car, au fil des générations, elle serait complètement submergée (« *swamped* ») par des traits qui sont moins éloignés de la moyenne. Fleeming Jenkin (1867) expliquait ainsi que, si l'on considère une population-mère de 10000 individus et si l'on fait l'hypothèse que de tels individus engendrent une progéniture de 1000000 effectifs, il en découle que tout individu avantageé par une variation singulière (c'est-à-dire une variation de grande ampleur, ou « *sport* » en anglais)

se reproduira et aura, en moyenne, 100 enfants ; or cette progéniture sera, en moyenne, intermédiaire entre l'individu moyen [c'est-à-dire qui correspond au type moyen de sa population] et la variation singulière [*'this progeny will, on the whole, be intermediate between the average individual and the sport'*]. Les chances en faveur de cette progéniture [*'The odds in favour of one of this generation of the new breed'*] seront de 1 et ½ contre 1, par comparaison avec l'individu moyen (...). À moins que ces individus ne se reproduisent entre eux, événement fort improbable, leur propre progéniture se rapprochera un peu plus de l'individu moyen [*'their progeny would again approach the average individual'*]. Elle sera de 150, avec une supériorité de 1 et 1/4 contre 1. Dans ces conditions, il est probable qu'au total deux survivront [en raison de l'élimination aléatoire qui intervient à chaque génération], et donneront 200 survivants, avec une supériorité d'un huitième. Un peu plus de deux parmi ceux-ci survivront ; mais la supériorité faiblit encore [*'but the superiority would again dwindle'*], et après un petit nombre de générations, on ne l'observerait plus du tout, et elle ne compterait pas davantage dans la lutte pour la vie que l'un quelconque des nombreux avantages qui affectent les organes ordinaires [*'would count for no more in the struggle for life, than any of the hundred trifling advantages which occur in the ordinary organs'*] (Fleeming Jenkin 1867, p. 289 ; cité par Gayon 1992, p. 104).

Comme le montre cet argument purement statistique, sous l'hypothèse d'hérédité par mélange (« *blending heredity* ») (Provine 1971, 2001 ; Bowler 1983, 1989), toute variation avantageuse pour un individu donné finit par être tout simplement « submergé par le nombre », à moins qu'il ne s'agisse d'une variation absolument indispensable à la survie de l'individu qui la possède, et non pas d'une variation qui n'est avantageuse qu'en termes relatifs – c'est-à-dire non pas d'une variation du type qui intéressait Darwin (1859). D'ailleurs, comme le remarquait Jean Gayon (1992), l'objection de Fleeming Jenkin (1867) « est indifférente à la question de l'ampleur de la variation. Elle s'applique indifféremment à une 'petite' ou à une 'grande' variation, en dépit de l'usage par Jenkin du mot

'sport', sans doute ici mal choisi » (Gayon 1992, p 104). Il en découle que, si l'hypothèse de l'hérédité par mélange était vraie, aucun processus d'accumulation graduelle de petites variations individuelles et relativement avantageuses ne pourrait jamais se produire.

En conséquence, c'est précisément pour une telle raison que l'on peut considérer que les objections de Jenkin (1867) constituaient « le défi le plus 'remarquable' [*valuable*] » (Gayon 1992, p. 105) qu'eût été adressé à la théorie de Darwin (1872), comme ce dernier avait fini par le reconnaître lui-même³⁰². Preuve en est que le problème de l'hérédité par mélange peut être considéré comme étant l'une des raisons qui ont amené ce que Peter J. Bowler (1983) a appelé « l'éclipse du darwinisme » (« *the eclipse of Darwinism* »). Il s'agissait, plus précisément, du déclin de popularité parmi les experts et les amateurs des sciences naturelles qu'avait subi la théorie darwinienne de l'évolution à l'aube du XX^e siècle – face aux alternatives dont nous avons parlé plus haut (le lamarckisme, l'orthogénèse, le mutationnisme, etc.) –, si bien que, à l'époque, l'on pouvait imaginer que le darwinisme « serait bientôt complètement éliminé des rangs des principales théories de l'évolution » (« *would soon be eliminated altogether as a major evolutionary theory* ») (Bowler 1983, p. 4). Un tel problème était, en effet, lié non seulement à la question de la préservation des variations favorables aux individus qui en sont porteurs – qu'il s'agisse de petites ou de grandes variations – mais également à celui de l'efficacité de la sélection naturelle en tant que « force créatrice » (« *creative force* ») de l'évolution (Bowler 1983, p. 25), puisque, s'il était vrai que la base matérielle sur laquelle était censée agir cette dernière ne se prêtait pas à être modifiée de manière significative – du moins sur la longue durée –, il était impossible d'attribuer l'émergence de nouvelles formes organiques à l'action de la sélection naturelle, métaphoriquement conçue comme étant, justement, une force de traction et de pression. Cela représentait, en conséquence, un échec pour le « cadre interprétatif » (« *interpretive framework* ») (Depew 2013, p. 122) que Darwin (1859) avait lui-même élaboré, par le biais d'une stratégie rhétorique de « cadrage » (« *framing* »), à la fois « conceptuel » (« *conceptual* ») et « métaphorique » (« *metaphorical* »), comme l'a observé David J. Depew (2009, 2012, 2013). Une telle stratégie consistait, en effet, à mobiliser dynamiquement les métaphores de la force et du « dessein » (« *design* ») dans le but de « déplacer l'accent, en ce qui concerne les réflexions théoriques sur l'évolution, des tendances internes aux pressions qui s'exercent de l'extérieur » (« *shifting the accent in evolutionary theorizing from inner tendencies to externally impinging pressures* »), et notamment à la sélection naturelle en tant qu'expression de « forces

³⁰² « Jusqu'à ce que j'ai lu un remarquable et compétent article [*'an able and valuable article'*] paru dans la North British Review (1867), je n'avais pas apprécié à quel point les variations isolées [*'single variations'*], qu'elles soient légères ou fortement marquées [*'whether slight or strongly-marked'*], pouvaient n'être que rarement perpétuées » (Darwin 1872 ; 1873, p. 98 ; cité par Gayon 1992, p. 104).

environnementales externes [aux organismes] » (« *external, environmental forces* ») (Depew 2012, p. 121). Les doutes qui avaient surgi quant à la capacité des variations hérissables de constituer le substrat du changement évolutif, ainsi qu'à l'efficacité de la sélection naturelle en tant que force créatrice avaient donc fini, bien au contraire, par remettre au goût du jour l'idée que l'évolution serait, en dernière instance, le produit de forces intrinsèques au vivant lui-même³⁰³. En conséquence, c'est précisément en ceci qu'elles offraient une solution à ces deux problèmes conjoints que les conséquences que l'on avait pu tirer des principes de Mendel (1866) se sont avérées, une fois qu'elles avaient été formulées en termes mathématiques, indispensables pour étayer la théorie darwinienne de l'évolution par l'accumulation, au fil des générations, de petites différences individuelles qui sont retenues par la sélection naturelle. Plus précisément, elles ont permis d'éclairer les relations qui existent entre trois concepts fondamentaux, à savoir les concepts de variation, d'hérédité et de sélection. Cela dit, en quoi les conséquences mathématiques des principes mendéliens ont-elles donc permis de mieux caractériser ces trois concepts ? En quoi sont-elles-mêmes reliées aux fondements des modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique » ? En quoi ont consisté les contributions que de tels modèles ont pu apporter à l'élaboration de la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

Un exemple paradigmatique de la manière dont l'analyse des conséquences des lois de Mendel (1866) a permis d'éclairer les relations entre la variation, l'hérédité et la sélection, ainsi que de jeter, par ce même biais, les fondements des modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », est donné par le principe d'équilibre dit « de Hardy-Weinberg » (Hardy 1908 ; Weinberg 1908 ; Rice 2004, p. 5-6), dont nous avons déjà parlé plus haut, et que l'on peut considérer comme étant une conséquence directe de la « loi mendélienne de la ségrégation » (« *Mendel's law of*

³⁰³ Comme l'a observé, encore une fois, Bowler (1983), ceux qui critiquaient Darwin (1859) avaient, en effet, beau jeu d'affirmer que « tant que l'origine de la variation restait inexpliquée [*'was unexplained'*], la sélection naturelle ne constituait pas un mécanisme exhaustif pour expliquer l'évolution [*'natural selection was not a complete mechanism of evolution'*]. C'était la variation qui était la véritable force créatrice [*'the really creative force'*] de l'évolution, alors que la sélection naturelle se limitait tout simplement à en éliminer les produits qui n'étaient pas à la hauteur des enjeux [*'merely weeding out those of its products that were not up to scratch'*]. Il était donc souvent supposé que la variation ne soit pas tout simplement aveugle [*'merely random'*], mais qu'elle doit être façonnée par des forces positives [*'shaped by positive forces'*], qui orientent, par ce même biais, le cours de l'évolution [*'thereby direct the course of evolution'*]. Il se pourrait que de telles forces soient surnaturelles [*'supernatural'*], comme dans le cas de l'évolution théiste [*'as in theistic evolution'*], ou bien naturelle [*'natural'*], comme dans le cas du lamarckisme ou dans celui de l'orthogénèse » (Bowler 1983, p. 25).

segregation ») (Morrison 2007, p. 318)³⁰⁴. Ce principe décrit, en effet, l'évolution des fréquences relatives de tous les génotypes possibles pour un *locus* autosomique (« *autosomal locus* ») – c'est-à-dire pour l'emplacement d'un gène qui est situé sur un chromosome non sexuel – donné, dans une population où les individus sont répartis de manière homogène et peuvent se croiser librement – c'est-à-dire dans une « population panmictique » (« *panmictic population* ») (Rice 2004, p. 5). Il permet ainsi d'établir que, quelles que soient les fréquences de départ des différentes variantes alléliques qui peuvent occuper le *locus* considéré, des fréquences génotypiques stables – qui ne sont rien d'autre que des « fréquences binomiales » (« *binomial frequencies* ») (Rice 2004, p. 5) – émergeront dès la première génération de croisements aléatoires entre les membres de la population en question. Plus précisément, si l'on dénote l'*i*-ème allèle, parmi ceux qui occupent le *locus* en question, par A_i et sa fréquence par p_i , les fréquences d'équilibre des génotypes correspondants seront les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Freq}(A_i A_i) &= p_i^2 \\ \text{Freq}(A_i A_j) &= 2p_i p_j \quad (\text{pour } i \neq j) \end{aligned}$$

(Rice 2004, p. 6). Selon un tel schéma, les fréquences qui émergent après la première génération de croisements seront ensuite conservées par l'effet d'une sorte d'« inertie génétique » (Gayon 1992). Il en découle que, dans un système d'hérédité mendélienne, la variabilité génétique ne se dilue pas par un quelconque effet de submersion des variantes les moins répandues, puisque la composition de la population ne s'écartera, justement, pas de l'équilibre atteint à l'issue de la première génération. Tout écart par rapport à de telles fréquences d'équilibre sera donc imputable à l'action de quelques facteurs évolutifs, ou causes évolutives, et donc, plus précisément, de la migration ou du flux de gènes, de la dérive génétique aléatoire, des mutations et, principalement, de la sélection naturelle (Gayon 1992 ; Provine 1971, 2001 ; Morrison 2007). Les conséquences du principe de Hardy-Weinberg pour l'étude

³⁰⁴ « Les études de Mendel indiquaient que l'une des conséquences immédiates de la ségrégation chez des organismes qui sont capables de s'autofertiliser, comme les pois, était une diminution ordonnée et prédictible de la proportion d'individus hétérozygotes dans les générations successives qui sont engendrées à partir du croisement de deux parents homozygotes [*'an immediate consequence of segregation in self-fertilizing organisms like peas was an orderly and predictable decrease in the proportion of heterozygotes in successive generations produced from a cross between two initial homozygotes'*]. En conséquence, les croisements endogames (entre les membres d'une seule et même population) [*'inbreeding'*] devraient conduire à une réversion graduelle des populations descendantes aux types homozygotes originaux des parents [*'a gradual reversion of offspring populations to the original homozygotic parental types'*]. Lorsque la reproduction non-aléatoire est la norme, l'on pourra donc s'attendre à ce que la fréquence des individus hétérozygote décline » ... jusqu'à ce que, après n générations, la population en question « aura la structure suivante [*'the following structure'*] $(2^n - 1)A:2Aa:(2^n - 1)a$ » (Morrison 2007, p. 318).

de la variation de la composition génétique d'une population donnée sont, par conséquent, deux : d'une part, ce principe permet d'établir une relation simple entre les fréquences des allèles et celles des génotypes (Rice 2004, p. 5) ; d'autre part, il constitue une sorte de « principe de stabilité » qui nous permet d'en conclure, par déduction quasiment directe des lois de Mendel (1866) et moyennant un nombre limité de présupposés idéalisés, que, dans un système d'hérédité mendélienne par opposition à un système d'hérédité par mélange, il n'existe aucune tendance intrinsèque à la réduction de la variation qui est constituée par la présence de différents génotypes, homozygotes ou hétérozygotes, au fur et à mesure que les facteurs héréditaires en question sont transmis d'une génération à la suivante (Gayon 1992 ; Provine 1971, 2001 ; Morrison 2007). Il en découle que, si l'on adopte une conception mendélienne de la variation génotypique qui constitue le substrat de l'évolution par sélection naturelle, il est possible non seulement de répondre aux objections concernant la stabilité de la variation héréditaire et l'effectivité de la sélection naturelle que nous avons mentionnées plus haut, mais également de dériver d'autres lois, qui décrivent les modalités d'action des différents facteurs évolutifs, ou des différentes causes évolutives – qu'ils agissent isolément ou en combinaison les uns avec les autres –, et notamment les modalités d'action de la sélection naturelle. Ainsi, c'est précisément en cela que consistent non seulement la manière dont les conséquences mathématiques des lois de Mendel (1866) permettent d'éclairer les relations entre les concepts de variation, d'hérédité et de sélection, mais également le lien que l'on peut établir entre ces mêmes conséquences, au premier chef le principe de Hardy-Weinberg, et les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique ». Ces derniers ne sont, en effet, rien d'autre que les représentations abstraites des processus évolutifs que l'on peut formuler à partir des lois d'action des différents facteurs évolutifs, ou des différentes causes évolutives, et qui visent à répondre à l'interrogation suivante : quelle distribution des fréquences des génotypes, ou des gènes (allèles), dont se constitue le *pool* génétique de la population en question devrait-on s'attendre à observer, sous l'hypothèse que cette dernière se trouve dans un état d'équilibre de Hardy-Weinberg, et, dans le cas contraire, de quelle manière l'action d'un ou de plusieurs facteurs évolutifs permettrait-elle de rendre compte des écarts observés ?

Plus précisément, comme nous pouvons le déduire de la manière dont James F. Crow et Motoo Kimura (1970) présentent ces mêmes modèles dans leur *Introduction à la génétique théorique des populations (An Introduction to Population Genetics Theory)*, le processus d'abstraction qui les sous-tend s'opère à deux niveaux différents. Le premier niveau d'abstraction consiste dans la modélisation de la population en question comme s'il s'agissait d'un système génétique qui se compose d'un certain nombre d'allèles alternatifs, situés dans un certain nombre de *locus*. De ce point de vue, les modèles les plus simples sont du type « *locus* biallélique autosomique » (un *locus* qui est situé sur un

chromosome qui n'est pas un chromosome sexuel et qui est occupé par deux allèles). L'autre niveau d'abstraction concerne, en revanche, la modélisation des « causes de l'évolution » (« *causes of evolution* ») (Haldane 1932), qui sont représentées sous la forme de couples « fréquence-coefficient », et donc sous la forme de variations de fréquences alléliques ou génotypiques. Pour ne citer qu'un exemple, nous pouvons considérer le « modèle à générations discrètes » (« *discrete generation model* ») – c'est-à-dire un modèle qui ne prévoit pas l'existence de générations qui se superposent (« *overlapping generations* ») et dans lequel on compare les différentes générations prises au même âge, notamment au « stade zygotique » (« *zygote stage* ») – permettant de calculer la variation des fréquences respectives, p_1 et p_2 , de deux allèles qui occupent un seul et même *locus* biallélique autosomique, A_1 et A_2 , dans une condition d'« équilibre entre sélection et mutation » (« *equilibrium between selection and mutation* »), que présentent, encore une fois, Crow et Kimura (1970, p. 258-259). Si, par exemple, l'on part du présupposé que A_2 soit un allèle délétère, alors il est possible de représenter les fréquences et les valeurs de *fitness* (ou valeurs sélectives), à la première génération, des génotypes dont se compose la population en question de la manière suivante :

Génotype	A_1A_1	A_1A_2	A_2A_2
Valeur de <i>fitness</i>	w_{11}	$w_{12} = w_{11}(1 - hs)$	$w_{22} = w_{11}(1 - s)$
Fréquence	P_{11}	$2P_{12}$	P_{22}

(Crow & Kimura 1970, p. 258), où $w_{11} \geq w_{22}$, ainsi que $w_{11} \geq w_{12}$, puisque l'on suppose que l'allèle A_2 est délétère, et où s est le coefficient, toujours compris entre 0 et 1, qui mesure l'intensité de la sélection négative à laquelle est sujet l'allèle délétère A_2 , telle qu'on peut l'exprimer sous la forme d'une différence en pourcentage entre la valeur de *fitness* du génotype homozygote A_1A_1 et celle du génotype homozygote A_2A_2 ³⁰⁵, alors que h est le coefficient, lui aussi compris entre 0 et 1, qui exprime le degré de dominance de A_2 sur A_1 relativement à la valeur de *fitness*, considérée comme caractère phénotypique³⁰⁶. Il en découle que la valeur de *fitness* moyenne des trois génotypes en question sera

³⁰⁵ Plus précisément, $s = \frac{(w_{11}-w_{22})}{w_{11}} = 1 - \frac{w_{22}}{w_{11}}$, si bien que, si $w_{11} \geq w_{22}$, alors $0 \leq s \leq 1$.

³⁰⁶ Il s'ensuit que : 1) si A_2 est complètement récessif par rapport à A_1 , alors $h = 0$ et, quelle que soit l'intensité de sélection s , la valeur de *fitness* du génotype hétérozygote, A_1A_2 , est égale à celle du génotype homozygote A_1A_1 , c'est-à-dire $w_{12} = w_{11}$; 2) si A_2 est incomplètement récessif ou incomplètement dominant par rapport à A_1 , alors, respectivement, $0 < h < 0,5$ ou $0,5 < h < 1$ et, quelle que soit l'intensité de sélection s , la valeur de *fitness* du génotype hétérozygote, A_1A_2 , est intermédiaire entre celles des deux génotypes homozygotes, c'est-à-dire $w_{22} < w_{12} < w_{11}$; 3) si

$$\bar{w} = P_{11}w_{11} + 2P_{12}w_{12} + P_{22}w_{22}$$

(Crow & Kimura 1970, p. 258). Comme l'expliquent toujours Crow et Kimura (1970), si les valeurs w_{12} et w_{22} sont inférieures à w_{11} (c'est-à-dire si $h \neq 0$ et $s \neq 0$), la fréquence de A_2 diminuera inexorablement, à moins que cette diminution ne soit contrecarrée par le taux de mutation des allèles A_1 en allèles A_2 , que l'on peut représenter par le coefficient $0 \leq u \leq 1$, quitte à ignorer l'existence de mutations qui vont dans le sens inverse. Par conséquent, si l'on prend en considération cet autre coefficient, la fréquence de l'allèle A_1 à la génération successive, p_1' , en fonction de sa fréquence et de sa valeur de sélection à la première génération, p_1 et w_1 , s'exprimera comme suit :

$$p_1' = p_1 \frac{w_1}{\bar{w}} (1 - u) = \frac{(p_1 w_1)(1 - u)}{\bar{w}} = \frac{(P_{11}w_{11} + P_{12}w_{12})(1 - u)}{\bar{w}}$$

où la quantité $(1 - u)$, au numérateur, « représente la fraction de gènes A_1 qui n'ont pas subi de mutations au cours de la génération présente et que l'on peut toujours compter parmi les allèles A_1 » (« represents the fraction of A_1 genes that have not mutated during the current generation and are therefore still to be counted as A_1 ») (Crow & Kimura 1970, p. 529). Il s'ensuit que, si la population a atteint un état d'équilibre, sous l'action « opposée » de la sélection naturelle et de la pression de mutation que mesure le coefficient u , la fréquence de l'allèle A_1 , p_1' , et celle de l'allèle A_2 , p_2' , à la seconde génération demeureront constantes tout au long des générations successives, si bien que l'on peut écrire ce qui suit :

$$\begin{cases} p_1' \bar{w} = p_1 \bar{w} = (P_{11}w_{11} + P_{12}w_{12})(1 - u) \\ p_2' = p_2 = (1 - p_1) \end{cases}$$

(Crow & Kimura 1970, p. 259). Ce système de deux équations décrit, par conséquent, la composition génétique de la population, ainsi modélisée, dans l'hypothèse qu'elle ait atteint un état d'équilibre à l'issue d'un processus déterminé par l'action de la sélection naturelle et d'une certaine pression de

les deux allèles sont codominants, alors $h = 0,5$ et, quelle que soit l'intensité de sélection s , la valeur de *fitness* du génotype hétérozygote est égale à la moyenne arithmétique de celles des deux génotypes homozygotes, c'est-à-dire $w_{12} = \frac{w_{11} + w_{22}}{2}$; 4) si A_2 est complètement dominant par rapport à A_1 , alors $h = 1$ et, quelle que soit l'intensité de sélection s , la valeur de *fitness* du génotype hétérozygote est égale à celle du génotype homozygote A_2A_2 , c'est-à-dire $w_{12} = w_{22}$. Voir Bourguet (2001) pour plus de précisions au sujet de la nature du coefficient h .

mutation, quoiqu'il soit toujours possible de rendre une telle représentation plus réaliste en y introduisant davantage des contraintes (la présence d'un allèle complètement récessif, l'existence de croisements endogamiques, celle de croisements aléatoires avec dominance partielle ou complète, etc.). C'est précisément dans un tel sens que l'on peut donc en conclure, comme l'a fait Richard Lewontin (2000), que la fonction épistémique des modèles de la génétique des populations, dite « classique », a toujours consisté à « affirmer l'existence aussi bien de certains résultats des processus évolutifs que de certaines forces déterminantes, qui contribuent à la réalisation de ces mêmes résultats » (« *make existential claims about both outcomes of evolutionary processes and about significant forces that contribute to those outcomes* ») (Lewontin 2000, p. 194), notamment la mutation et la sélection naturelle³⁰⁷. Cela dit, en quoi auraient consisté, plus précisément, les contributions que des modèles mathématiques tels que celui que nous venons de décrire auraient apportées à la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, du moins telles que les présentait Provine (1977) ?

Ayant mené une analyse exhaustive des articles écrits par Fisher, Haldane et Wright, ainsi que des principaux ouvrages publiés dans le domaine de la biologie de l'évolution entre 1932 et 1959³⁰⁸ et de « la correspondance inédite de personnalités qui avaient été impliquées dans la synthèse évolutive, ou qui en avaient été influencées » (« *the unpublished correspondence of persons involved in the evolutionary synthesis, or affected by it* ») – notamment, de la correspondance entre Theodosius Dobzhansky et Sewall Wright – (Provine 1977, p. 10), Provine (1977) en a conclu que les modèles de la génétique des populations, dite « classique », ont « exercé une influence significative sur la

³⁰⁷ Cette remarque de Lewontin (2000) rejoint, ainsi, ce qu'observait Jean Gayon (1992) lorsqu'il écrivait que la théorie de la sélection « mendéliée » qui a émergé de l'analyse quantitative des implications des principes mendéliens et des modèles mathématiques de la génétique théorique des populations possède « deux caractères fondamentaux : 1° Elle se donne comme une cinétique capable de prédire la vitesse à laquelle un caractère se répand ou régresse dans une population sous l'effet de la sélection [, et donc comme une description dynamique des changements qui résultent de certains processus évolutifs] ; 2° Elle s'articule nécessairement avec une théorie de la mutation, car si la sélection n'est que diffusion d'un allèle nouveau dans une population, il faut admettre que l'allèle nouveau n'est pas lui-même engendré par une sélection naturelle [, ce qui signifie qu'elle affirme l'existence d'une pluralité de forces, ou causes, évolutives] » (Gayon 1992, p. 305).

³⁰⁸ Parmi de tels ouvrages, Provine (1977) mentionnait explicitement non seulement *Genetics and the Origin of Species* de Theodosius Dobzhansky (1937), mais également *The New Systematics* et *Evolution : the Modern Synthesis* de Julian Huxley (1940, 1942), *Systematics and the Origin of Species* d'Ernst Mayr (1942), *Tempo and Mode in Evolution* de G. G. Simpson (1944), *Neuere Probleme der Abstammungslehre (Les nouveaux problèmes de la théorie de la descendance)* de Bernhard Rensch (1947), ainsi que les actes du *Cold Spring Harbor Symposium on Theoretical Biology (Symposium des laboratoires de Cold Spring Harbor sur la biologie théorique)* de 1955, consacré à la génétique des populations, et de celui de 1959, consacré aux rapports entre la génétique et le darwinisme au XX^e siècle (Provine 1977, p. 10).

pensée évolutive d'au moins quatre manières différentes » (« *had a significant influence upon evolutionary thinking in at least four ways* ») (Provine 1977, p. 11). Premièrement, Provine (1977) mettait en avant le fait que, comme l'avaient déjà reconnu Waddington (1957) et Mayr (1959) eux-mêmes, de tels modèles avaient fini par conférer plus de crédibilité à l'hypothèse darwinienne que l'évolution biologique, notamment telle qu'elle est documentée par les travaux des paléontologues sur l'archive fossile, serait le résultat de la sélection de petites différences individuelles, en démontrant, d'un point de vue purement quantitatif, que « de faibles pressions de sélection pouvaient rendre compte des processus évolutifs » (« *small selection pressures could explain evolution* ») (Provine 1977, p. 14). Plus précisément, poursuivait-il, ce fut l'élégance et le pouvoir de persuasion dont avaient su faire preuve les arguments qu'avaient présentés, par exemple, Haldane (1924-1942) et Fisher (1930) qui permit de traduire, dans un temps relativement court, une telle preuve mathématique « dans la croyance de bon sens et de nature non-mathématique, que tout le monde pouvait comprendre, selon laquelle ces mêmes faibles pressions de sélection expliquaient, dans les faits, les processus évolutifs en conditions naturelles » (« *into the non-mathematical, common sense belief, which anyone could understand, that in fact such small selection pressures did explain evolution in nature* ») (Provine 1977, p. 14). En conséquence, quoique d'éminents évolutionnistes tels qu'Ernst Mayr (1942, 1980a, 1998) eussent minimisé, à plusieurs reprises, l'influence que les arguments mathématiques déployés par les généticiens des populations, dits « classiques », avaient eue sur leurs propres travaux, Provine (1977) pouvait mettre l'accent sur la dette que ces derniers devaient, tout de même, à Dobzhansky (1937) ou à Timofeïev-Ressovski (1940), c'est-à-dire à des biologistes qui ne faisaient pas mystère, pour leur part, du rôle qu'avaient joué ces mêmes arguments dans l'élaboration de leur propre vision de l'évolution, ainsi que de leur vision de la forme que devrait prendre l'étude empirique des phénomènes évolutifs³⁰⁹. Deuxièmement, toujours selon Provine

³⁰⁹ Plus précisément, en discutant des places respectives des modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », et des enquêtes de terrain dans l'étude de ceux qu'il considérait comme étant les principaux facteurs évolutifs, à savoir les mutations, la sélection et la dérive génétique aléatoire, Timofeïev-Ressovski (1940) écrivait ce qui suit : « L'analyse mathématique met en lumière les valeurs et les limites quantitatives de l'efficacité de chacun de ces trois facteurs [*Mathematical analysis shows the quantitative values and limitations of the efficiency of each of these three factors*'], ainsi que de leurs relations mutuelles, relativement à différentes conditions et valeurs arbitraires de pression de mutation, de pression de sélection et d'isolement. Ce type de travail mathématique est de la plus grande importance, puisqu'il nous montre l'efficacité relative de divers facteurs évolutifs dans les différentes conditions qui peuvent se présenter au sein des populations [*This type of mathematical work is of the greatest importance, showing us the relative efficacy of various evolutionary factors under the different conditions possible within the populations*'] (Wright 1932). Il ne nous dit, cependant, rien au sujet des conditions naturelles réelles [*real conditions in nature*'], ou sur les valeurs empiriques effectives des coefficients de mutation, de sélection, ou d'isolement [*the actual empirical values of the*

(1977), ce furent les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », qui permirent de limiter ce qu'on pourrait appeler « l'espace des explications possibles » pour les phénomènes évolutifs, et cela de deux manières principales. D'une part, ils ont éclairé « les relations qui existent entre les taux de mutation, la pression de sélection et les changements de fréquences géniques dans les populations mendéliennes » (« *the relationships between mutation rates, selection pressure, and changes of gene frequencies in Mendelian populations* »), en identifiant les conditions sous lesquelles il serait possible de falsifier les explications mutationnistes (Provine 1977, p. 18). Un exemple en est le modèle géométrique dont s'est servi Fisher (1930) dans le but de réfuter les alternatives saltationnistes à la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle, en montrant en quoi la probabilité qu'une certaine mutation soit adaptative, et donc bénéfique à l'organisme qui en est porteur, diminue rapidement au fur et à mesure qu'augmente l'ampleur de ses effets phénotypiques, jusqu'à tendre vers zéro (Fisher 1930, p. 39)³¹⁰. D'autre part, « en combinaison avec

coefficients of mutation, selection, or isolation']. C'est la tâche de demain que de découvrir l'ordre de grandeur de ces mêmes coefficients dans les populations sauvages [*free-living populations*'] de différentes espèces de plantes et d'animaux. Cela devrait constituer le but et le contenu d'une génétique empirique des populations [*the aim and content of an empirical population-genetics*'] (Buzzati-Traverso, Jucci & Timofeïev-Ressovski 1938) » (Timofeïev-Ressovski 1940, p. 103-104).

³¹⁰ Plus précisément, Fisher (1930) concevait le degré d'adaptation d'un caractère phénotypique, ou d'un ensemble de caractères phénotypiques, comme consistant dans son « degré de conformité » (« *degree of conformity* »), sous différents aspects, à un certain phénotype optimal (Fisher 1930, p. 38). C'est précisément sur la base d'un tel présupposé qu'il est possible, dans une perspective géométrique, de représenter les deux phénotypes en question comme étant, respectivement, un point quelconque, *A*, et un « point fixe » (« *fixed point* »), *O*, dans un espace donné, dont les dimensions dépendent du nombre d'aspects que l'on est en train de considérer, si bien que le degré d'adaptation du premier se définit comme n'étant rien d'autre que « la proximité avec laquelle » (« *the closeness with which* ») le point *A* s'approche du point fixe *O* (Fisher 1930, p. 38). Il en découle que, dans un espace tridimensionnel, l'on peut représenter l'ensemble des points qui correspondent à des variations adaptatives du phénotype que représente le point *A* comme consistant dans le volume qui est « enveloppé par une sphère qui passe par *A* et qui est centrée en *O* » (« *enclosed by a sphere passing through A and centred at O* »), si bien que toute mutation dont les effets sur ce même phénotype sont représentés par une translation du point *A*, dans n'importe quelle direction de l'espace et de distance fixe égale à *r*, sera une mutation adaptative si et seulement si le déplacement du point *A* qui en résulte est une translation interne à la sphère en question (Fisher 1930, p. 38). C'est pourquoi Fisher (1930) pouvait en conclure que, si l'ampleur des effets d'une mutation sur un phénotype donné, telle qu'on peut la mesurer par le biais de la distance *r*, est proche de zéro, alors la probabilité qu'un point *A* qui représente ce même phénotype et qui se trouve sur la surface de la sphère centrée en *O* se déplace vers un point interne à cette même sphère et la probabilité qu'il se déplace vers un point externe à cette dernière sont à peu près équivalentes. Dans ce premier cas de figure, l'on peut donc supposer que la probabilité que la mutation soit adaptative sera égale à 1/2. En revanche, si l'ampleur des effets de la mutation, *r*, est égale (voire supérieure) à la longueur du diamètre de la sphère centrée en *O*, *d*, alors il n'y aura aucune chance que le point *A* finisse par se déplacer, par translation, au sein de la sphère elle-même,

la génétique de laboratoire [*‘laboratory genetics’*] et avec le peu que l’on connaissait de la génétique des populations naturelles [*‘what little was known of the genetics of natural populations’*] », « la nouvelle théorie mathématique de la sélection » (« *the new mathematical theory of selection* ») était à même de fournir un ensemble d’hypothèses explicatives qui étaient relativement simples. Elles permettaient, notamment, de faire l’économie de toute discussion sur la nature de possibles « facteurs inconnus de l’évolution » (« *unknown factors of evolution* »), comme, pour ne citer qu’un exemple, la source ancestrale de « variation phylogénique » (« *phylogenic variation* »), alternative aussi bien à « la loi darwinienne du Hasard » (« *the Darwinian law of Fortuity* ») qu’à « la loi de l’action directe du Milieu de Buffon » (« *the Buffon law of the direct action of Environment* ») (Osborn 1895, p. 438), dont le paléontologue anglais Henry Fairfield Osborn (1895) postulait l’existence, au moyen de son principe du « potentiel de variation similaire » (« *potential of similar variation* ») (Osborn 1895, p. 434).

Troisièmement, Provine (1977) écrivait que les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations auraient contribué à l’élaboration de la théorie synthétique de l’évolution en fournissant « un cadre pour réinterpréter des données qui avaient déjà été recueillies à partir d’observations naturelles » (« *a framework for reinterpreting data already gathered from nature* ») (Provine 1977, p. 18). Afin de fournir un exemple de la façon dont ces mêmes modèles auraient exercé une telle fonction, nous pouvons considérer la manière dont R. A. Fisher et E. B. Ford (1926) ont examiné, à la lumière d’une certaine théorie de « la variabilité naturelle des espèces sauvages » (« *the natural variability of wild species* »), des données sur « la variabilité de trente-cinq espèces de *Lepidoptera*, notamment des papillons de nuit britanniques communs » (« *the variability of thirty-five species of Lepidoptera, chiefly common British moths* »), qui avaient précédemment été répertoriées par de nombreux naturalistes (Fisher & Ford 1926, p. 515). Plus précisément, Fisher et Ford (1926) étaient partis de l’hypothèse que, pour « une population présentant un système d’hérédité

c’est-à-dire qu’il n’y aura aucune chance que la mutation en question finisse par s’avérer adaptative. Il s’ensuit que, pour toute valeur $0 \leq r \leq d$, la probabilité que la mutation dont l’ampleur est mesurée par r soit adaptative est égale, dans un modèle géométrique tridimensionnel, à

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{r}{d}\right),$$

ce qui implique, justement, que « les chances d’amélioration [adaptative par mutation] diminuent ainsi progressivement, à partir de leur valeur limite $\frac{1}{2}$, quand r est égale à zéro, jusqu’à s’annuler quand r est égale à d » (« *The chance of improvement thus decreases steadily from its limiting value $\frac{1}{2}$ when r is zero, to zero when r equals d* ») (Fisher 1930, p. 39).

entièrement mendélien » (« *a population exhibiting inheritance wholly on Mendelian lines* »), il serait possible d'interpréter la quantité de variabilité génétique empiriquement observée, telle qu'elle est mesurée par la variance génétique de tel ou tel caractère, comme étant le résultat d'une « condition d'équilibre » (« *equilibrium condition* ») entre deux forces évolutives de signe opposé, à savoir les mutations, qui tendent à augmenter la variabilité génétique, et la sélection naturelle, qui tend à la diminuer (Fisher & Ford 1926, p. 515). Ce faisant, ils sont parvenus à la conclusion qu'il faudrait s'attendre à ce que les espèces qui comptent les plus grands nombres d'effectifs soient également les espèces les



Figure 8 : Histogramme qui représente la variance moyenne de trois groupes d'espèces, définis en fonction de l'abondance de leurs effectifs (Fisher & Ford 1926, p. 515)

plus variables, car, étant donné une espèce abondante, il est plus probable que les taux de mortalité différentielle dont sont affectés ses membres soient le résultat d'un processus de sélection, plutôt que d'événements aléatoires, ce qui était parfaitement compatible avec les données qu'ils avaient pu analyser, comme le montre l'histogramme à la figure (8). Cet histogramme représente, en effet, la « variance moyenne » (« *average variance* ») des trois catégories d'espèces que Fisher et Ford (1926) avaient eux-mêmes identifiées, sur la base des données qu'ils avaient eues à leur disposition, à savoir les « espèces abondantes » (« *abundant species* »), les « espèces répandues » (« *common species* ») et les « espèces qui sont, tout au plus, relativement répandues, voire rares » (« *rather common to rare species* ») (Fisher & Ford 1926, p. 515), et il nous permet d'en conclure que les espèces les plus abondantes sont également les plus variables. En conséquence, c'est précisément en se servant d'un modèle de la génétique des populations, dite « classique », que Fisher et Ford (1926) ont pu fournir une interprétation théorique de phénomènes qui avaient déjà été observés par des naturalistes, en éclairant, par ce même biais, les fondements génétiques. Quatrièmement, Provine (1977) estimait également que les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations auraient permis de formuler des hypothèses empiriquement testables sur les caractéristiques propres à certaines populations naturelles, ainsi que de concevoir des expériences de laboratoire, en différents domaines des sciences de la vie, dans la mesure où ils auraient fourni aux naturalistes et aux biologistes expérimentaux les moyens d'« identifier clairement quelques paramètres fondamentaux du processus évolutif et [d'] élucider les possibles structures et les possibles dynamiques des populations naturelles » (« *by identifying clearly some relevant parameters of the evolutionary process, and by*

elucidating possible structures and dynamics of natural populations ») (Provine 1977, p. 20), comme en témoignerait, par exemple, la série d'enquêtes de terrain sur la « variation chromosomique et génique dans les populations naturelles de *Drosophila pseudoobscura* » (« *chromosomal and genic variation in natural populations of Drosophila pseudoobscura* ») (Provine 1977, p. 23) qui a été conduite, entre 1938 et 1959, par Dobzhansky et par ses collaborateurs, dont, notamment, Sewall Wright lui-même (Dobzhansky & Wright 1941, 1943, 1946, 1947 ; Dobzhansky, Wright & Hovanitz 1942). C'est ainsi que, dans un article consacré aux relations entre les taux de mutations et l'accumulation d'allèles létaux sur le troisième chromosome autosomique dans les populations naturelles de *Drosophila pseudoobscura*, Dobzhansky (Dobzhansky & Wright 1941) se sert de la relation quantitative entre « la fréquence d'équilibre d'un allèle autosomique récessif léthal » (« *the equilibrium frequency of a recessive autosomal lethal* ») au sein d'une population donnée, le taux de mutation de ce même allèle dans la population en question et la « taille effective » (« *effective size* »)³¹¹ de cette dernière qu'avait déjà formulée, justement, Sewall Wright (1937b), sur la base de considérations purement théoriques (Dobzhansky & Wright 1941, p. 26)³¹².

Une telle appréciation des contributions de Wright (1916, 1917a, 1917b, 1918, 1920, 1921a, 1921b, 1922, 1923a, 1923b, 1929, 1930, 1931a, 1931b, 1932, 1933, 1937a, 1937b), Fisher (1918, 1922, 1927, 1928, 1930 ; Fisher & Ford 1926), Haldane (1919a, 1919b, 1924-932, 1929, 1930, 1932) et Tchetverikov (1921, 1927 ; Tchetverikov, Lerner & Parker 1961) au développement de ce que Gould (2002) appelait la « première phase » de la Synthèse Moderne nous permet, en conséquence, de donner une première réponse à la question de savoir en quoi aurait consisté le rôle qu'auraient joué les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations à cette étape particulière de l'histoire de la biologie évolutive, ainsi qu'à l'étape immédiatement successive. Plus précisément, nous pouvons en conclure que la « constriction », ou « restriction », de l'espace théorique des

³¹¹ Le concept de « taille effective d'une population », introduit par Wright (1931a, 1931b, 1933) lui-même, renvoie à « la taille que devrait avoir une population idéalisée pour qu'elle se comporte comme la population réelle, plus complexe » (« *what size an idealized population would have to be in order for it to behave like the more complex real population* »), qu'elle est censée représenter sous tel ou tel aspect (Rice 2004, p. 109).

³¹² « La fréquence d'équilibre d'un allèle autosomique récessif léthal – c'est-à-dire la fréquence à laquelle il lui sera permis de s'accumuler dans une population donnée [*that is, the frequency to which it will be allowed to accumulate in a population*] – est une fonction de son taux de mutation, ainsi que de la taille effective de la population dans laquelle il est présent [*a function of its mutation rate as well as of the effective size of the population in which it occurs*]. Dans des populations qui sont très larges [*in very large populations*], le niveau d'équilibre est la racine carrée du taux de mutation auquel se produit l'allèle léthal [*the equilibrium level is the square root of the mutation rate producing the lethal*] ; dans des populations plus petites [*in smaller populations*], ce niveau est moins élevé que dans les populations les plus larges [(Wright 1937b)] » (Dobzhansky & Wright 1941, p. 26).

sciences de l'évolution (Provine 1986, 1989 ; Gould 2002) qu'auraient entraînée ces mêmes modèles aurait consisté à remplir une double fonction. Premièrement, ils auraient exercé une fonction négative, dans la mesure où ils auraient permis d'identifier un ensemble limité de facteurs causaux, dont l'existence et l'intensité pouvaient faire l'objet de tests empiriques guidés par des hypothèses quantitatives, à savoir, les mutations, la dérive génétique aléatoire, les migrations (ou, plus généralement, le flux de gènes qui y est associé) et la sélection naturelle. Cela aurait progressivement amené les biologistes à exclure, par une sorte de souci de « parcimonie explicative », tous les autres facteurs qui avaient pu être invoqués afin d'expliquer les phénomènes évolutifs, tels que le « facteur de Lamarck » (« *Lamarck's factor* »), c'est-à-dire « la transmission de variations somatogénétiques » (« *the transmission of somatogenic variation* ») (Osborn 1895, p. 435), et donc de caractères acquis, qui sont adaptatives et qui anticipent des variations phylogéniques, le « facteur de Buffon » (« *Buffon's factor* »), c'est-à-dire l'action directe du milieu dans la production de variations héréditaires, le « facteur de Saint Hilaire » (« *Saint Hilaire's factor* »), c'est-à-dire l'idée que l'évolution se produirait par « saltations occasionnelles » qui seraient causées par « une brusque modification du mécanisme héréditaire » (« *by sudden modification of the hereditary mechanism* ») (Osborn 1895, p. 438), ou le « facteur de Nägeli » (« *Nägeli's factor* »), c'est-à-dire l'idée que « la tendance à la variation et donc à l'évolution est prédéterminée par la constitution de l'organisme » (« *the trend of variation and hence of evolution is predestined by the constitution of the organism* ») (Osborn 1895, p. 433). Deuxièmement, ils auraient également exercé une fonction positive, qui aurait consisté à poser les jalons de cette unification de différentes branches des sciences de la vie, autour d'un noyau théorique qui n'était rien d'autre qu'une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, dans laquelle Gould (2002) a identifié, encore une fois, la « seconde phase » de la Synthèse Moderne. Cela découlerait du fait que les modèles de la génétique des populations dite « classique » auraient permis non seulement d'écarter les explications non-darwiniennes, mais également de réinterpréter des *explananda* qui avaient déjà été identifiés, notamment par les naturalistes-évolutionnistes ou par les naturalistes pré-darwiniens, à la lumière des nouveaux *explanantia* qu'il était possible de formuler sur la base des quatre facteurs que nous avons rappelés plus haut, ainsi que d'élargir l'éventail même des phénomènes et des processus dont la théorie (synthétique) de l'évolution par sélection naturelle était appelée à rendre compte. Nous pouvons donc en conclure que les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », auraient amorcé un processus de synthèse qui se serait achevé, dans une première phase, par l'élaboration de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et qui se serait poursuivi, dans la phase successive, par l'expansion d'une telle théorie en un véritable cadre

conceptuel pour les sciences de la vie. Mais en quoi aurait consisté, plus précisément, ce processus de synthèse ?

Afin de répondre à une telle question, nous pouvons caractériser la Synthèse Moderne comme ayant consisté dans une synthèse au sens, pour ainsi dire, « bachelardien » du terme. En s'appuyant sur les analyses du physicien et philosophe polonais Czeslaw Bialobrzewski (Bialobrzewski *et al.* 1939), Gaston Bachelard (1940) opposait, en effet, la dialectique philosophique telle que l'avait conçue Hegel (1816) – c'est-à-dire la dialectique comme processus de la pensée qui « procède par opposition de la thèse et de l'antithèse et de leur fusion dans une notion supérieure de la synthèse » (Bachelard 1940, p. 135-136) – à la dialectique proprement scientifique, dont le moment synthétique consisterait, en revanche, à « envelopper » (Bachelard 1940, p. 137) les opposés. Dans l'activité scientifique, précisait Bachelard (1940), les opposés ne seraient pas contradictoires, mais plutôt complémentaires. C'est ainsi que, comme l'observait Georges Canguilhem (1963), le mouvement dialectique dont parlait Bachelard (1940) ne procéderait pas par la création de nouvelles contradictions, mais par la résolution des contradictions passées, en montrant, de manière rétroactive, la nature illusoire de leur position et en parvenant ainsi à coordonner les mêmes concepts qu'elle avait auparavant opposés les uns aux autres. « Ce que Bachelard nomme dialectique », poursuivait Canguilhem (1963), « c'est le mouvement inductif qui réorganise le savoir en élargissant ses bases, où la négation des concepts et des axiomes n'est qu'un aspect de leur généralisation³¹³. Cette rectification des concepts, Bachelard la nomme d'ailleurs enveloppement ou inclusion aussi volontiers que dépassement » (Canguilhem 1963, p. 441). Il en découle que, dans l'analyse de Bachelard (1940), l'activité scientifique nierait l'opposition immédiate entre deux concepts non pas pour se développer « en hauteur », en aboutissant ainsi à une synthèse qui constituerait un niveau de connaissance supérieur, mais pour se développer, pour ainsi dire, « en largeur », afin d'étendre la base inductive du savoir scientifique lui-même. La synthèse à laquelle elle parviendrait consisterait ainsi à réorganiser les rapports entre les concepts et à les coordonner les uns avec les autres, au sein d'un nouveau cadre de pensée, dans le but de mieux approximer la réalité des phénomènes observés ou produits en laboratoire. Par conséquent, il est possible d'appliquer une telle définition du concept même de « synthèse scientifique » au rôle qu'ont joué les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations dans la Synthèse Moderne, aussi bien dans une première que dans une seconde phase, en ceci que les conséquences déductives

³¹³ « La philosophie du non n'est pas une volonté de négation. Elle ne procède pas d'un esprit de contradiction qui contredit sans preuves, qui soulève des arguties vagues. Elle ne fuit pas systématiquement toute règle. Au contraire, elle est fidèle aux règles à l'intérieur d'un système de règles. Elle n'accepte pas la contradiction interne. Elle ne nie pas n'importe quoi, n'importe quand, n'importe comment. C'est à des articulations bien définies qu'elle fait naître le mouvement inductif qui la caractérise et qui détermine une réorganisation du savoir sur une base élargie » (Bachelard 1940, p. 135).

que l'on a pu tirer de ces derniers – en tant que représentations idéalisées des populations d'organismes, des processus évolutifs qui affectent ces dernières, ainsi que des facteurs, ou des causes, de ces mêmes processus – ont amorcé un mouvement inductif qui a fini par élargir la base empirique de la théorie darwinienne de l'évolution, et donc également d'affirmer le pouvoir et la légitimité épistémiques du principe de la sélection naturelle. Plus précisément, de tels modèles ont permis de réinterpréter des *explananda* qui avaient déjà été identifiés, ainsi que d'en mettre au jour de nouveaux, comme les rapports entre l'accumulation d'un allèle létal dans une population de *Drosophila pseudoobscura* et les taux de mutation qui produisent ce même allèle qui ont fait l'objet de l'article de Dobzhansky et Wright (1941) dont nous avons parlé plus haut. En outre, ils ont également permis de forger de nouveaux concepts qui ont aidé à réorganiser la connaissance du vivant, en coordonnant des notions qui avaient auparavant été opposées les unes aux autres, telles que, par exemple, les notions de mutation et de sélection, les notions de gène et de population, etc. Un exemple en sont, encore une fois, les conséquences déductives que Fisher et Ford (1926) ont tirées des modèles de la génétique théorique des populations afin d'interpréter la variabilité phénotypique, c'est-à-dire la matière première de l'évolution, comme étant le produit des relations mutuelles entre une pression de mutation et une pression de sélection, ce qui leur a permis, comme nous venons de le montrer, d'apporter un nouvel éclairage sur des questions qui avaient déjà été posées bien avant que la théorie synthétique de l'évolution ne vît le jour. En conséquence, la compréhension du déroulement de la Synthèse Moderne que nous pouvons retirer des analyses de Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et de Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) nous permet d'apporter d'autres réponses à la question de savoir si la Synthèse Moderne se serait effectivement déployée le long des axes thématiques que nous avons identifiés plus haut, ainsi qu'à celle de savoir si l'on pourrait caractériser la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel comme étant une extension de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle.).

D'une part, nous pouvons en conclure que la théorie synthétique de l'évolution se serait structurée, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, non pas autour de l'axe « gènes-organismes », mais autour de l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs », puisque la synthèse bachelardienne qu'auraient produite les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations aurait consisté, justement, à confirmer l'intuition darwinienne du « pouvoir prédominant » (« *paramount power* ») (Darwin 1875) de la sélection naturelle comme facteur causal des phénomènes évolutifs, et notamment de « la modification des espèces » (Gayon 1995, p. 128)³¹⁴. Plus précisément, de tels

³¹⁴ « Le troisième concept utilisé par Darwin pour caractériser le statut de la sélection naturelle est celui de 'pouvoir prédominant' [*paramount power*]. Dans *L'origine des espèces*, la sélection naturelle est souvent évoquée comme un agent travaillant perpétuellement en faveur du 'bien' et de 'l'amélioration' de tous les êtres organiques. Toutefois c'est dans *La*

modèles auraient contribué, dans un premier temps, à écarter tous les autres « facteurs de l'évolution », connus ou inconnus, dont parlait, par exemple, Osborn (1895) et, dans un second temps, à rendre possible la preuve directe de l'efficacité de la sélection naturelle, par la mise à l'épreuve empirique de leurs conséquences déductives. Les naturalistes-évolutionnistes d'avant la Synthèse Moderne, y compris Darwin (1859, 1875) lui-même, avaient dû, au contraire, se contenter d'adopter une approche qui se fondait sur une « stratégie de corroboration indirecte » visant à démontrer que la théorie que l'on pouvait construire sur la base de l'hypothèse darwinienne de la sélection naturelle permettait de rendre compte d'un vaste éventail de phénomènes différents, qui constituaient, par conséquent, autant de preuves indirectes de la validité de cette dernière (Gayon 1992, p. 186-187)³¹⁵. Il s'ensuit que nous pouvons nous servir, encore une fois, de l'espace théorique de la biologie évolutive que nous avons précédemment défini afin de représenter également la manière dont Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) envisageaient la Synthèse Moderne, ainsi que l'édifice théorique qui en était issu. Il s'agit, notamment, de la conception de la Synthèse Moderne que nous décrivons par le biais du diagramme à la figure (9). Selon une telle conception, la Synthèse Moderne se serait donc déployée le long de l'axe « sélection-autres facteurs évolutifs » et aurait fini par occuper une place qui correspond à la conjonction des

Variation que l'on trouve les formules philosophiquement les plus précises sur le 'pouvoir' de la sélection : 'L'accumulation renouvelée de variations bénéfiques aura infailliblement conduit aux structures merveilleusement diversifiées, adaptées à diverses fins, et excellemment coordonnées, que nous voyons dans les animaux et les plantes qui nous entourent. C'est pourquoi j'ai parlé de la sélection comme étant le *pouvoir prédominant* appliqué, aussi bien par l'homme dans la *formation* des races domestiques, que par la nature dans la *production des espèces*' (Darwin [1875] 1972, vol. 8, p. 426. Notre traduction. Italiques ajoutées). Par delà le ton emphatique de ce texte, dont le style n'est pas sans faire penser à celui de la théologie naturelle, il est important d'observer que c'est en référence à une classe particulière de faits de l'histoire naturelle que Darwin parle de la sélection comme d'un 'pouvoir prédominant' : les faits de modification des espèces. En termes modernes, l'on dirait que la sélection est la 'force' ou le 'facteur' majeur qui oriente le changement évolutif » (Gayon 1995, p. 128).

³¹⁵ « Sur l'hypothèse [de la sélection naturelle] est en effet construite une théorie, c'est-à-dire une argumentation montrant comment l'hypothèse explique de nombreux groupes de faits. Par exemple : distribution géographique passée et actuelle des races et des espèces, affinités systématiques, homologues, rapports entre embryogenèse et phylogenèse. On pourrait aisément en ajouter d'autres, comme la genèse des instincts, les extinctions, les organes rudimentaires. Ces divers ensembles de faits sont autant d'épreuves pour l'hypothèse, ce sont des manières de la 'tester'. Darwin attachait une particulière importance à ce que les faits expliqués soient indépendants les uns des autres. Il considérait par ailleurs que la puissance d'une hypothèse se mesurait à sa capacité d'absorber des anomalies apparentes, et de les transformer en conséquences. On reconnaît là une stratégie classique de validation par unification, confirmation, et conversion des anomalies en problèmes résolus, directement inspirée du modèle newtonien de la science expérimentale » (Gayon 1992, p. 186-187).

thèses suivantes : (1) « la sélection naturelle constitue le principal facteur évolutif » ; (2) « ce sont les génotypes, et non pas les organismes, qui représentent les véritables objets de la sélection naturelle » ;

(3) « les grandes tendances macro-évolutives ne seraient rien d'autre qu'une extension de processus micro-évolutifs ».

En effet, ni Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001), ni Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) n'ont attribué à la Synthèse Moderne le « sélectionnisme génique » (« *genic selectionism* ») qu'ont élaboré, plus tardivement, G. C. Williams (1966) et Richard Dawkins (1976), c'est-à-dire

« l'idée que les gènes [– et donc ni les organismes, ni les génotypes –] sont les (seules et

uniques) unités de sélection [*genes are the (unique) units of selection*] et que tous les phénomènes évolutifs peuvent être représentés de manière adéquate au niveau des gènes [*all evolutionary events can be adequately represented at the genic level*] » (Brandon & Nijhout 2006, p. 277). Pour ne mentionner qu'un exemple, alors que – comme nous venons de le voir – il maintenait que la Synthèse Moderne avait mis l'accent sur les fondements génétiques de l'évolution, Gould (1992) écrivait également que, en citant David Hull, « les gènes subissent des mutations, les individus sont sélectionnés, les espèces évoluent. Du moins, c'est ce qu'affirme le point de vue darwinien orthodoxe » (« *genes mutate, individuals are selected, and species evolve. Or so the orthodox, Darwinian view proclaims* ») (Gould 1992, p. 85). C'est pour une telle raison que nous avons placé la Synthèse Moderne, telle que la concevaient Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), dans une position intermédiaire le long de l'axe « gènes-organismes ». Ce diagramme nous permet, ainsi, d'en conclure non seulement que ces derniers concevaient la Synthèse Moderne comme étant presque diamétralement opposée à leurs propres vues

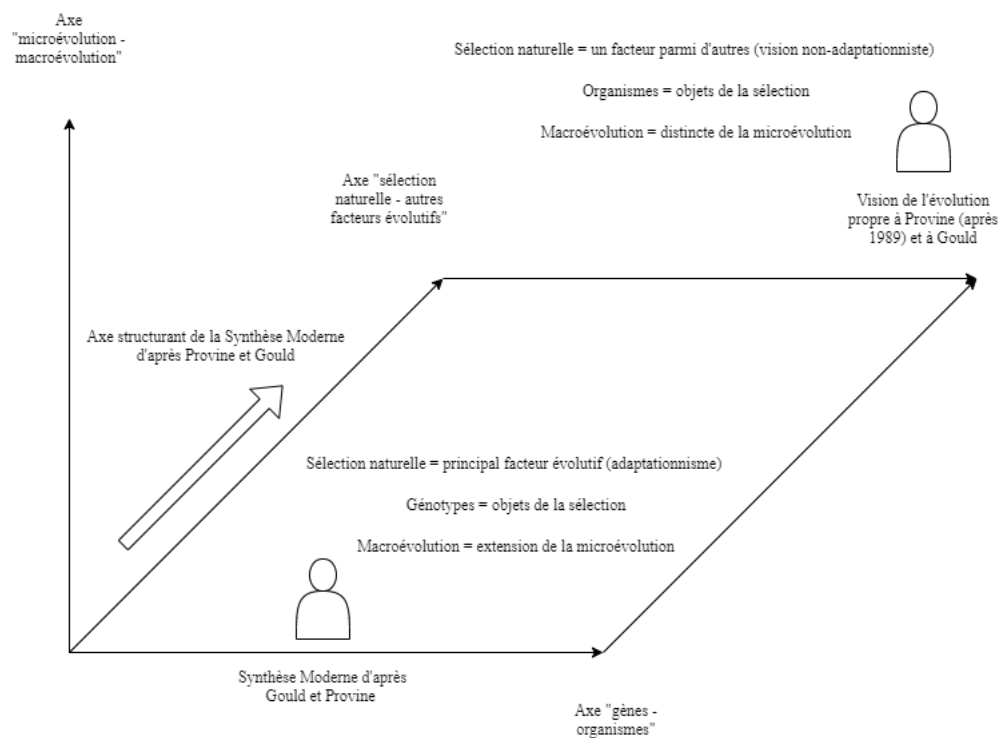


Figure 9 : Point de vue de Provine et de Gould sur la Synthèse Moderne, ainsi que sur l'évolution en tant que processus naturel

sur l'évolution en tant que processus naturel³¹⁶, mais également que l'hypothèse historico-épistémologique que l'on peut déduire de leur point de vue est opposée, et non pas complémentaire, à celle que l'on peut dériver des analyses de Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a), notamment en ce qui concerne l'axe problématique qui a structuré la Synthèse Moderne et la nature des objets de la sélection naturelle tel qu'ils sont conçus dans le cadre conceptuel qui est issu de ce même processus historique.

D'autre part, nous pouvons également en conclure que, tout comme Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a), Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) envisageaient la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel, comme étant le résultat d'un seul et même processus synthétique. Néanmoins, contrairement à Mayr (1980a, 1982, 1993, 1998a), ils considéraient aussi que la théorie synthétique dans cette seconde acception du terme n'aurait pas été autre chose qu'une extension de la théorie synthétique dans la seconde acception du terme, dans la mesure où elle aurait consisté à fédérer des traditions de recherche disparates, propres aux différentes branches des sciences de la vie, autour, justement, d'une théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, si bien que la génétique des populations, dite « classique », y aurait joué un rôle fondamental. Plus précisément, si l'on accepte la reconstruction de la Synthèse Moderne qu'a proposée Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002), en accord avec Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001), l'on peut en déduire qu'un tel processus synthétique se serait articulé en deux mouvements. Comme nous l'avons anticipé plus haut, le premier de ces deux mouvements aurait coïncidé, notamment, avec la « constriction » de l'espace des facteurs évolutifs dont nous avons parlé plus haut. L'autre mouvement aurait, en revanche, consisté à « durcir » la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel, dans un sens adaptationniste, et n'aurait, cependant, été rien d'autre que le résultat d'une application trop stricte, du moins aux yeux de Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002),

³¹⁶ En ce qui concerne Provine (1971, 1989, 2001), il faut cependant remarquer que ses vues sur l'évolution ont changé dans la période de temps qui s'est écoulée entre la première édition de son ouvrage sur les origines de la génétique théorique des populations (Provine 1971) et la seconde (Provine 2001). Entre 1959 et 1970, Provine (2001) était, en effet, persuadé que « la sélection naturelle était le principal mécanisme à tous les niveaux du processus évolutif » (« *Natural selection was the primary mechanism at every level of the evolutionary process* ») (Provine 2001, p. 197), que le concept de *pool* génique représentait « un concept central de la biologie de l'évolution » (« *a central concept in evolutionary biology* ») et que « la macroévolution était une extension conceptuellement simple de la microévolution » (« *Macroevolution was a conceptually simple extension of microevolution* ») (Provine 2001, p. 198). Entre 1989 et 2001, il a, en revanche, fini par problématiser ces mêmes thèses, et donc par remettre en question la prééminence de la sélection naturelle en tant que facteur évolutif, la centralité du concept de *pool* génique et l'existence d'un *continuum* entre les phénomènes micro-évolutifs et les phénomènes macro-évolutifs.

des contraintes que les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », avait fini par imposer au développement de la Synthèse Moderne. Il en découle que nous pouvons formuler au moins deux hypothèses alternatives – et donc non pas complémentaires – qui sont aussi bien de nature historiographique que de nature épistémologique. Plus précisément, il s’agit d’hypothèses qui portent sur la structure et sur les origines de la théorie synthétique, aussi bien en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie qu’en tant que théorie génétique de l’évolution par sélection naturelle, et que nous appellerons, respectivement, l’« hypothèse de Mayr » et l’« hypothèse de Provine-Gould ». Nous pouvons donc les résumer par le biais du tableau récapitulatif ci-dessus :

	Axe qui a structuré la Synthèse Moderne	Relations entre macroévolution et microévolution d’après la Synthèse Moderne	Objets de la sélection naturelle d’après la Synthèse Moderne	Place de la sélection naturelle d’après la Synthèse Moderne
Hypothèse de Mayr	Axe « gènes-organismes »	Macroévolution = extension de la microévolution	Organismes	Place centrale
Hypothèse de Provine-Gould	Axe « sélection naturelle-autres facteurs évolutifs »	Macroévolution = extension de la microévolution	Génotypes	Place centrale

Cela dit, en quoi serait-il possible de mettre à l’épreuve la validité de ces deux hypothèses, et notamment de la seconde ? Plus précisément, comment pourrions-nous vérifier si la seconde phase de la Synthèse Moderne, du moins telle que l’identifiait Gould (2002), s’est effectivement caractérisée par un processus de synthèse bachelardienne comme celui que nous venons de décrire ? Et en quoi pourrions-nous vérifier si le « durcissement » de la Synthèse Moderne dont parlait ce dernier a effectivement eu lieu ?

1.2 Le durcissement de la Synthèse Moderne et l'émergence du programme adaptationniste : deux facettes du même processus

Comme nous venons de l'explicitier, l'hypothèse de Provine-Gould sur la structure et les origines de la théorie synthétique de l'évolution (à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie) se fonde sur le présupposé que les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », auraient joué un rôle fondamental dans la Synthèse Moderne. En ce qui concerne la seconde acception du terme « théorie synthétique de l'évolution » (c'est-à-dire la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie), un tel rôle aurait consisté, d'une part à fédérer plusieurs branches traditionnelles des sciences de la vie autour du noyau théorique qu'aurait constitué la théorie synthétique dans l'autre acception du terme (c'est-à-dire en tant que théorie génétique de l'évolution), d'autre part à contraindre la conception de l'évolution qui sous-tendait le cadre conceptuel qui avait émergé de ce même processus. Plus précisément, aux yeux de Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002) et de Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001), les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », auraient été utilisés comme fondement pour imposer aux branches des sciences de la vie qui avaient été réunies dans le cadre de la théorie synthétique de l'évolution ce que Richard Lewontin (1978) appelait la « vision moderne de l'adaptation » (« *modern view of adaptation* »). Une telle vision de l'adaptation consiste, en effet, à envisager les organismes comme étant des êtres qui doivent faire face aux « problèmes » (« *problems* ») que leur posent les conditions environnementales dans lesquelles ils vivent. De tels problèmes requièrent, ainsi, des « solutions » (« *solutions* ») et le mécanisme naturel par lequel les organismes parviennent à trouver des solutions qui sont de plus en plus convenables à leurs conditions de vie serait précisément l'adaptation, en tant

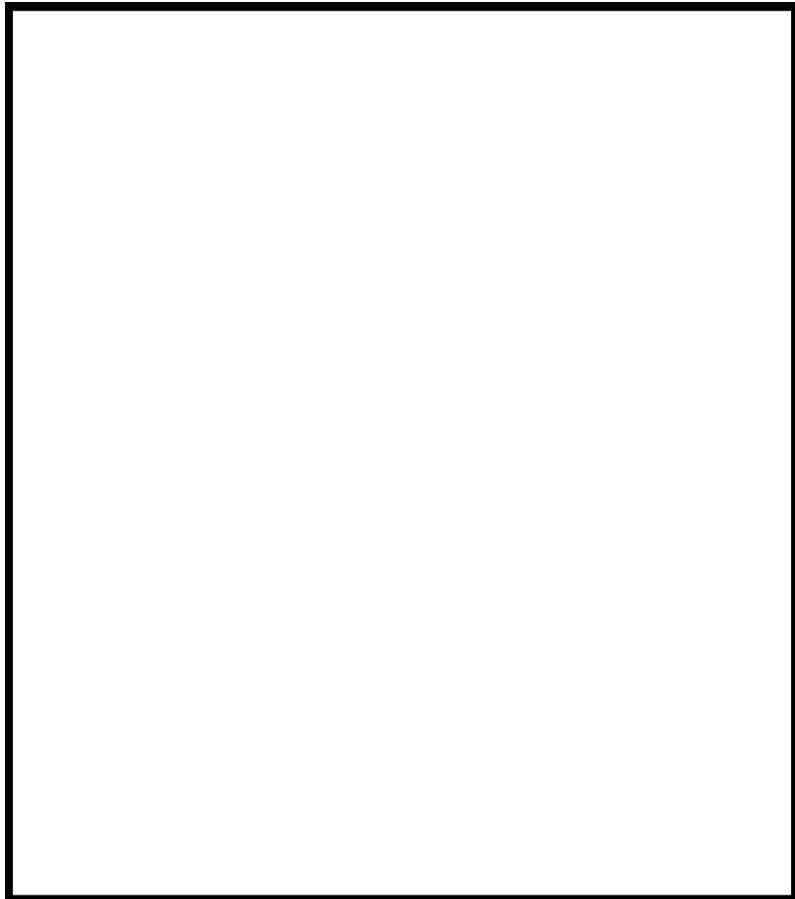


Figure 10 : L'évolution des oiseaux à partir des reptiles comme processus d'adaptation visant à résoudre le « problème du vol » (Lewontin 1978, p. 214)

que « processus de changement évolutif » (« *process of evolutionary change* ») (Lewontin 1978, p. 213). Pour ne citer qu'un exemple, l'évolution des oiseaux à partir de leurs ancêtres reptiliens a comporté de nombreuses modifications de leur structure physique : les os, les muscles et la peau de leurs membres antérieurs se sont modifiés jusqu'à ce que ces derniers ne se muent en ailes ; leur sternum a augmenté de taille et c'est ainsi qu'il a pu constituer un point d'ancrage solide pour les muscles alaires ; la structure même de leurs os a changé de telle sorte qu'ils aient pu devenir non seulement plus légers, mais également plus robustes ; les plumes qui ont couvert leur peau ont contribué à ce que la structure globale de leur corps devienne plus aérodynamique et à ce que leur surface corporelle soit mieux isolée d'un point de vue thermique – voir la figure (10), tirée de Lewontin (1978, p. 214), à ce sujet. Tous ces changements peuvent donc être envisagés comme autant de solutions performantes au « problème du vol » (« *problem of flight* ») (Lewontin 1978, p. 213)³¹⁷. En conséquence, une telle vision de l'adaptation constitue également un programme de recherche « adaptationniste » (« *adaptationist program* ») (Lewontin 1978 ; Gould & Lewontin 1979), qui détermine la manière dont les biologistes de l'évolution qui l'adoptent affrontent les questions qui se posent lorsque l'on essaie de rendre compte de l'existence et de la nature d'un certain caractère phénotypique à partir du présupposé que ce dernier soit le résultat d'un processus d'adaptation. Plus précisément, les biologistes qui se situent dans un cadre adaptationniste jugent du niveau d'adaptation d'un caractère donné en adoptant, pour ainsi dire, « une posture d'ingénieur » et en analysant aussi bien les relations qui existent entre les différents caractères phénotypiques d'un organisme donné que celles qui existent entre ce même organisme et son environnement. C'est ainsi qu'ils finissent par se trouver

dans la position d'un archéologue qui découvre une machine dont il n'y a aucune trace écrite et qui tente d'en reconstituer non seulement le fonctionnement, mais également la fonction préétablie [*'attempts to reconstruct not only its operation but also its purpose'*]. L'hypothèse selon laquelle les plaques dorsales [*'dorsal plates'*] du stégosaure [*'Stegosaurus'*] étaient un dispositif de régulation de la chaleur [*'a heat-regulation device'*] repose sur le fait que les plaques étaient poreuses et

³¹⁷ « Cette transformation complète d'un reptile pour en faire un oiseau est considérée comme étant un processus d'adaptation majeur, par le biais duquel les oiseaux ont résolu le problème du vol [*'a process of major adaptation by which birds solved the problem of flight'*]. Pourtant, l'adaptation n'a pas de fin. Après s'être adaptés au vol, certains oiseaux ont inversé le processus [*'reversed the process'*] : les pingouins se sont adaptés à la vie marine en changeant leurs ailes en palmes et leurs plumes en une couverture imperméable, en résolvant, par ce même biais, le problème de la vie aquatique [*'the penguins adapted to marine life by changing their wings into flippers and their feathers into a waterproof covering. thus solving the problem of aquatic existence'*] » (Lewontin 1978, p. 213).

contenaient probablement une grande quantité de vaisseaux sanguins [*'the plates were porous and probably had a large supply of blood vessels'*], sur le fait qu'elles se trouvaient en position alternée à gauche et à droite de la ligne médiane (ce qui suggère qu'elles fonctionnaient comme s'il s'agissait d'ailettes de refroidissement) [*'on their alternate placement to the left and right of the midline (suggesting cooling fins)'*], sur le fait qu'ils étaient de grande taille dans la partie la plus massive du corps du stégosaure [*'on their large size over the most massive part of the body'*] et sur le fait qu'il y avait une constriction à leur base, où elles [se trouvaient au] plus près de la source de chaleur et [auraient donc constitué] des émetteurs de chaleur inefficients [*'where they are closest to the heat source and would be inefficient heat radiators'*] (Lewontin 1978, p. 218).

En d'autres termes, dans le cadre de ce que Lewontin (1978) appelait le « programme adaptationniste », les biologistes de l'évolution font appel à des considérations qualitatives et quantitatives, ainsi qu'à des raisonnements *ceteris paribus*, afin de reconstruire la « conception » (« *design* »), ou le « dessin », de tel ou tel caractère phénotypique sur la base du présupposé que ce dernier remplisse une fonction donnée, en permettant ainsi à l'organisme qui le possède de résoudre de manière optimale un problème qui lui est posé par l'environnement dans lequel il vit.

Afin d'illustrer ce concept, Lewontin (1978) citait comme exemple la manière dont G. H. Orians et N. E. Pearson (1979) avaient expliqué le comportement d'approvisionnement en nourriture d'une certaine espèce d'oiseaux (la carouge à épauettes, *Agelaius phoeniceus*), qui consiste à sortir du nid, à recueillir de la nourriture et à la ramener au nid pour la consommer, ce qu'on appelle une « stratégie d'approvisionnement centralisée » (« *central-place foraging* »). En émettant l'hypothèse que « pour chaque distribution effective des dimensions des particules de nourriture qu'on peut observer dans la nature, il existe un certain comportement d'approvisionnement optimal pour l'oiseau en question, qui maximisera le gain d'énergie net qu'il retire de la nourriture » (« *for any actual distribution of food-particle sizes in nature there is some optimal foraging behavior for the bird that will maximize its net energy gain from feeding* ») (Lewontin 1978, p. 220), et en prenant en considération les préférences en matière de dimensions des particules de nourriture manifestées par les spécimens qu'ils avaient observés, Orians et Pearson (1979) avaient donc pu en conclure que la stratégie d'approvisionnement centralisée devait être interprétée comme étant le résultat d'un compromis entre la nécessité d'obtenir un rendement énergétique maximal et celle de ne pas passer trop de temps loin du nid, afin de mieux protéger la progéniture. Une telle explication, glosait Lewontin (1978),

illustre une hypothèse fondamentale de toutes ces analyses techniques [*'engineering analyses'*], l'hypothèse de *ceteris paribus*, ou 'toutes choses étant

égales par ailleurs'. Afin d'avancer l'argument qu'un caractère est une solution optimale à un problème particulier, il faut que l'on puisse considérer aussi bien le caractère que le problème en question de manière isolée, toutes choses étant égales par ailleurs [*In order to make an argument that a trait is an optimal solution to a particular problem, it must be possible to view the trait and the problem in isolation, all other things being equal*']. Si toutes les autres choses ne sont pas égales par ailleurs, lorsqu'un changement qui se manifeste dans un trait de caractère, comme solution à un problème donné, change la relation que l'organisme en question entretient avec d'autres problèmes que pose l'environnement, il devient impossible d'effectuer une telle analyse partie par partie, et nous nous retrouvons dans la position désespérée d'être forcés à considérer l'organisme entier comme étant adapté à l'environnement entier [*left in the hopeless position of seeing the whole organism as being adapted to the whole environment*'] (Lewontin 1978, p. 220).

En conséquence, c'est précisément sur la base de cette même définition de l'adaptationnisme que – dans deux articles où il s'interroge, respectivement, sur la possibilité de l'émergence d'« une nouvelle théorie de l'évolution » (« *a new evolutionary theory* ») et sur les raisons qui auraient entraîné ce qu'il considérait comme ayant été un « durcissement de la Synthèse Moderne » (« *hardening of the synthesis* ») et de la théorie qui en était issue – Gould (1980b, 1983) défendait la thèse d'après laquelle la manière dont le mécanisme de sélection naturelle est conçu au sein de la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel, sur la base des contraintes que lui imposent les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations, se réduirait, justement, à une interprétation adaptationniste de cette dernière.

Pour ce faire, Gould (1980b, 1983) donnait, précisément, une lecture adaptationniste de la première partie de la définition de la théorie synthétique qu'avait formulée Ernst Mayr (1980a, 1998a), dans la mesure où il l'interprétait comme étant une affirmation de la thèse d'après laquelle la variation génétique ne constituerait rien d'autre que la « matière brute » (« *raw material* ») du changement évolutif, qui serait donc entièrement dirigé par la sélection naturelle. Dans une telle perspective, qui se serait cristallisée en tant qu'orthodoxie néodarwinienne entre le début des années 1940 et la fin des années 1950, la vitesse et la direction du changement évolutif ne seraient, par conséquent, rien d'autre qu'une simple fonction de l'intensité et de la direction de la pression exercée par la sélection naturelle. Cette dernière amènerait, à quelques exceptions près, des changements adaptatifs, en dépit de toute contrainte phylétique ou morphologique à laquelle elle pourrait se heurter (Gould 1980b, p. 119-120). Comme l'a observé Jean Gayon (2009b), le but principal de l'article de Gould (1980b) était donc de critiquer précisément cette tournure dogmatique qu'aurait prise la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel, au cours de son développement, et

notamment sur la base de principes adaptationnistes. La critique du durcissement de la Synthèse Moderne et de la théorie synthétique, en tant que construction d'un cadre conceptuel adaptationniste pour les sciences de la vie, que développait ce dernier consistait ainsi

à mettre en avant une 'approche hiérarchique' de l'évolution à trois niveaux du processus évolutif : variation intrapopulationnelle, spéciation et patrons macroévolutifs. Gould soutient qu'à chacun de ces niveaux, la conception de l'évolution comme accumulation de petits changements génétiques guidée par la sélection naturelle a été réfutée³¹⁸ (Gayon 2009b, p. 338).

Nous pouvons donc en conclure que c'est précisément dans l'adoption d'une telle conception de l'évolution – que Gould et Lewontin (1979) considéraient comme étant plus proche du « pansélectionnisme » de Weismann (1868, 1875, 1876, 1909) ou d'Alfred Russell Wallace (1899) que de la vision pluraliste des causes de l'évolution que prônait Darwin (1859, 1880) – qu'aurait consisté ce que Gould (1980b, 1983, 2002) lui-même appelait, justement, le « durcissement de la Synthèse Moderne ». Plus précisément, afin d'étayer cette thèse, Gould (1980b, 1983) s'appuyait sur l'analyse des itinéraires intellectuels qu'avaient suivis deux pères fondateurs de la théorie synthétique, à savoir Theodosius Dobzhansky (1937, 1951) et George Gaylord Simpson (1944, 1953), en comparant les différents ouvrages pionniers, dans le domaine de la biologie de l'évolution, dont ces derniers avaient été les auteurs et qui étaient, respectivement, *Genetics and the Origin of Species* – dont la première édition date de 1937 et la troisième de 1951 – ainsi que *Tempo and Mode in Evolution* (Simpson 1944) et *The Major Features of Evolution* (Simpson 1953). Son intention était de faire ressortir les analogies et les différences entre les vues que ces deux auteurs avaient adoptées au sujet du rôle causal de la sélection naturelle, ainsi qu'au sujet des rapports entre microévolution et macroévolution, vers la fin des années 1930 et la direction dans laquelle ces mêmes vues avaient successivement évolué dans l'espace d'une dizaine d'années. Mais une telle appréciation des relations entre la Synthèse Moderne et le programme adaptationniste est-elle effectivement justifiée,

³¹⁸ Plus précisément, « au niveau de la génétique des populations, Gould invoque la neutralité de la majorité des changements génétiques, au niveau moléculaire. Au niveau de la spéciation, il se réfère à divers modèles de spéciation (en particulier au modèle parapatrique de [M. J. D. White (1968, 1978)]) qui, selon lui, montrent que l'isolement reproductif n'est pas un produit secondaire de l'adaptation, mais un changement rapide et stochastique. Cela le conduit à dire que la spéciation, loin d'être un produit dérivé de processus sélectifs, est en fait une source de variation stochastique qui offre prise à une sélection de niveau plus élevé que la sélection darwinienne intraspécifique. Enfin, au niveau de la macroévolution, Gould parle principalement des équilibres ponctués et défend l'idée que les tendances évolutives ne sont pas une simple extrapolation de l'évolution intraspécifique, mais résultent de taux différentiels de spéciation et d'extinction parmi les espèces » (Gayon 2009b, p. 338).

notamment en ce qui concerne la place qu'occupe le principe de la sélection naturelle dans la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ? Autrement dit, en quoi consisteraient les principes explicatifs qui découleraient d'une conception adaptationniste de l'évolution ? En quoi correspondraient-ils à la manière dont la sélection naturelle a pu être conçue au sein du cadre conceptuel de la théorie synthétique, tel qu'il s'est constitué entre les années 1930 et les années 1950 ? En quoi pourrait-on envisager le programme adaptationniste comme étant le résultat des contraintes que les modèles de la génétique des populations, dite « classique », imposent à la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel ?

Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier temps (section 1.2.1), en quoi consistent les deux étapes que Gould et Lewontin (1979) ont décelées dans toutes les explications qui relèvent du programme adaptationniste, dans le but de critiquer ce même programme. Ces deux étapes consistent, respectivement, à décomposer tel ou tel organisme en un ensemble de traits phénotypiques isolés qui auraient été conçus par la sélection naturelle de manière, pour ainsi dire, « optimale » relativement à une certaine fonction biologique, ainsi qu'à reconnaître l'existence de possibles arbitrages entre l'optimisation de traits différents, qui remplissent des fonctions qui peuvent entrer en conflit les unes avec les autres. Afin d'étayer les analyses de Gould et Lewontin (1979), nous les confronterons à la manière dont l'un des défenseurs du programme adaptationniste tel que George C. Williams (1992) l'a lui-même présenté dans un ouvrage qu'il a consacré au concept même de « sélection naturelle ». Cette comparaison nous permettra, en conséquence, d'identifier deux principes fondamentaux, auxquels on pourrait résumer l'intégralité du programme adaptationniste. Le premier de ces deux principes consiste, notamment, à faire l'hypothèse que, afin de pouvoir identifier la fonction de tel ou tel trait phénotypique, il serait nécessaire de l'isoler de tous les autres traits de caractères auxquels il est associé chez tel ou tel organisme, si bien que nous le qualifierons de « principe d'isolement fonctionnel ». L'autre principe, que nous appellerons « principe d'optimalité », consiste, en revanche, à affirmer qu'il faut considérer tout trait de caractère phénotypique comme étant optimal, voire comme ayant été optimisé par l'action de la sélection naturelle, par rapport à la fonction évolutive qu'on lui a attribuée. Nous verrons, cependant, qu'il s'agit moins d'un véritable principe d'optimalité que d'un principe de « sous-optimalité », en ceci qu'il doit rendre compte des arbitrages entre différents traits phénotypiques dont parlaient également Gould et Lewontin (1979). Mais de quelle manière un tel principe aurait-il fini par structurer le programme adaptationniste ? Pour répondre à cette autre question, nous analyserons de près les critiques que Gould et Lewontin (1979) ont adressées à la conception adaptationniste de l'évolution par sélection naturelle. Nous verrons, notamment, en quoi ces derniers considéraient le principe de (sous-)optimalité comme constituant un véritable « obstacle épistémologique » (Bachelard 1938),

puisqu'il finirait par engendrer des « styles d'argumentation » (« *styles of argument* ») qui consisteraient, tout simplement, à fournir des arguments explicatifs *ad hoc*, et donc, pour cette même raison, difficilement vérifiable d'un point de vue empirique (Gould & Lewontin 1979). C'était précisément pour une telle raison que Gould et Lewontin (1979) proposaient une série de principes explicatifs qui étaient alternatifs aux principes caractéristiques du programme adaptationniste et qui se réclamaient, tout en n'étant pas moins darwiniens que ces derniers, de l'hérédité d'un courant structuraliste dans l'histoire de la biologie de l'évolution. D'après un tel courant, les formes d'organisation propres au vivant s'expliqueraient non pas par les seuls processus d'adaptation, mais également sur la base de quelques normes d'organisation, relatives à des architectures complexes, qui seraient de nature universelle. Cela dit, en quoi les principes explicatifs alternatifs que proposaient Gould et Lewontin (1979) nous permettraient-ils de fonder une critique générale du programme adaptationniste ? En quoi pourrait-on relier une telle critique à la thèse, qu'a formulée Gould (1980b, 1983, 2002) lui-même, du « durcissement » de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, et donc également de la théorie synthétique qui en est issue ?

Pour répondre à ces autres questions, nous verrons, dans un second temps (section 1.2.2), en quoi la critique du programme adaptationniste qu'ont fini par élaborer Gould & Lewontin (1979) repose sur deux thèses principales. D'un point de vue épistémologique, ces derniers considéraient, en effet, que le programme adaptationniste se traduirait par une vision « panglossienne » de l'évolution qui finirait par légitimer toute sorte d'explication adaptationniste, quelque peu fondée qu'elle puisse être, ainsi que par mettre à l'écart toute approche alternative. D'un point de vue historiographique, ils estimaient que le programme adaptationniste serait le résultat d'une interprétation, pour ainsi dire, « moniste » de la théorie originaire de Darwin (1859, 1869) qui réduirait les causes de l'évolution à la seule action de la sélection naturelle. En conséquence, c'était précisément en cela que la critique du programme adaptationniste qu'avaient élaborée Gould et Lewontin (1979) rejoignaient la manière dont Gould (1980b, 1983, 2002) lui-même caractérisait le développement de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, entre la fin des années 1930 et le début des années 1950, c'est-à-dire comme ayant consisté dans un « durcissement » des présupposés ontologiques et méthodologiques de la théorie darwinienne de l'évolution qui aurait amené un véritable « triomphe de l'adaptationnisme » (« *triumph of adaptationism* ») (Gould & Lewontin 1979). Cela dit, de quelle manière cette thèse du durcissement de la Synthèse Moderne (Gould 1983), notamment tel qu'il se serait manifesté dans la maturation des positions de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) au sujet de l'importance évolutive des processus adaptatifs, pourrait-il nous aider à mieux comprendre en quoi consistent les liens que l'on pourrait identifier entre les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations, en tant que fondements de la théorie synthétique comme théorie génétique

de l'évolution, et la théorie synthétique comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie ? Dans quelle mesure l'établissement de ces mêmes liens se serait-il effectivement concrétisé par l'imposition de contraintes de nature adaptationniste à un tel cadre conceptuel ? Par conséquent, c'est précisément dans le but de résoudre de tels problèmes que nous analyserons la manière dont Dobzhansky (1951) présente le modèle du paysage adaptatif (« *adaptive landscape* ») de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) dans la deuxième édition de *Genetics and the Origin of Species*. En particulier, nous verrons en quoi Dobzhansky (1951) s'est servi d'un tel modèle non pas pour rendre compte des différences non-adaptatives que l'on peut observer à un niveau intraspécifique, c'est-à-dire entre des populations locales partiellement isolées, mais pour expliquer les différences adaptatives qui permettent de classer les organismes dans les diverses catégories taxonomiques dont se composent les classifications des naturalistes. Nous montrerons que, pour ce faire, Dobzhansky (1951) a appliqué le modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932) à deux niveaux d'analyse différents, à savoir, d'une part, au niveau des combinaisons géniques qui constituent les différents génotypes dont se compose le *pool* génétique d'une espèce donnée (ou plus généralement le *pool* génétique de telle ou telle population mendélienne) et, d'autre part, au niveau des combinaisons de traits phénotypiques qui correspondent à ces mêmes génotypes. De cette manière, Dobzhansky (1951) est donc parvenu à mettre en relation les différents pics (« *adaptive peaks* ») adaptatifs dont est parsemé le paysage que l'on peut associer à une espèce donnée, ou à un certain groupe d'espèces, avec autant de niches écologiques ou autant d'*habitats* différents, ce qui lui a permis de donner une interprétation adaptative du modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932), ainsi que de la théorie génétique de l'évolution dont ce dernier est censé fournir une représentation heuristique. Cela dit, en quoi consisteraient, plus précisément, de telles contraintes ? Dans quelle mesure la définition de la notion même de cadre conceptuel que nous avons déduit de la conception classique des théories scientifiques nous permettrait-elle d'en formuler une reconstruction formelle ?

1.2.1 Le « principe d'isolement fonctionnel » et le « principe d'optimalité » : deux piliers théoriques du programme adaptationniste

Dans le même article où ils mobilisent la métaphore des « écoinçons de la basilique de Saint Marc » (« *the spandrels of San Marco* ») afin de critiquer le programme adaptationniste, ainsi que de réaffirmer l'idée que

les organismes doivent être considérés comme étant des unités intégrées [*'must be analysed as integrated whole'*], dotés de *Baupläne* tellement contraints par leur

héritage phylétique, par leurs trajectoires développementales et par leur architecture générale [*‘so constrained by phyletic heritage, pathways of development and general architecture’*] que de telles contraintes deviennent elles-mêmes plus intéressantes et plus importantes pour en délimiter les trajectoires de changement [*‘delimiting pathways of change’*] que la force sélective pouvant servir de catalyseur pour le changement quand celui-ci se manifeste [*‘the selective force that may mediate change when it occurs’*] (Gould & Lewontin 1979, p. 581),

Gould et Lewontin (1979) énumèrent les différentes « étapes » (« *steps* ») qui constituent, à leur sens, le socle des arguments explicatifs qu’il est possible de formuler dans le cadre d’un tel programme. Ils analysaient également les implications de cette structure argumentative pour la manière dont les concepts de sélection naturelle et d’organisme sont définis dans le cadre de l’approche adaptationniste. Plus précisément, dans une première étape, « un organisme est fragmenté en ‘traits [de caractères phénotypiques]’ atomiques et ces traits sont expliqués comme s’ils étaient des structures conçues de manière optimale, par la sélection naturelle, en vue de leurs fonctions » (« *an organism is atomized into ‘traits’ and these traits are explained as structures optimally designed by natural selection for their function* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 585). Il en découle que le programme adaptationniste, du moins tel que le présentaient Gould & Lewontin (1979), implique une vision de l’organisme comme étant un ensemble de traits isolés, dont on ignore volontairement, tout au moins dans un premier moment, les relations mutuelles. Il s’agit, en conséquence, d’une vision « réductionniste » (« *reductionist* ») de l’organisme dans le sens ontologique du terme (Sarkar 1992 ; Nagel 1998 ; Brigandt & Love 2017)³¹⁹, que Gould et Lewontin (1979, p. 585) accusaient d’amener les biologistes à tirer de fausses conclusions au sujet de l’origine des traits qu’ils analysent, comme le montrerait le cas paradigmatique de l’évolution du menton chez l’homme (Gould 1977 ; Lewontin

³¹⁹ Il faut tout de même rappeler que la « réduction ontologique » (« *ontological reduction* »), telle que la définissent, par exemple, Ingo Brigandt et A. C. Love (2017), est « l’idée que chaque système biologique particulier (par exemple, un organisme) n’est constitué que de molécules et d’interactions entre ces dernières » (« *the idea that each particular biological system (e.g., an organism) is constituted by nothing but molecules and their interactions* »). Par conséquent, la vision adaptationniste de l’organisme ne peut pas être caractérisée comme étant une forme de réductionnisme ontologique dans ce premier sens du terme, car elle ne tient pas à la question des rapports entre deux niveaux d’organisation de la matière, à savoir le niveau physico-chimique et le niveau proprement biologique, mais à celle des rapports entre l’organisme, conçu comme une totalité, et les parties qui le constituent. Par conséquent, l’approche adaptationniste est ontologiquement réductionniste dans la mesure où l’organisme y est vu comme n’étant constitué que de caractères phénotypiques qui sont, à priori, isolés les uns des autres, et dont les interactions mutuelles ne sont prises en considération que dans un second moment.

1978)³²⁰. De plus, une telle vision de l'organisme implique également, comme nous l'avons vu plus haut, une approche « d'ingénieur » de l'analyse des traits qui le constituent, auxquels il serait possible d'attribuer des fonctions qui dépendraient de leurs « normes de conception » (« *design specifications* ») respectives. Il en découle que, dans une perspective adaptationniste, la conception d'un trait est supposée être « optimale » en vue de la fonction que doit remplir ce dernier. Ce premier aspect de la conception adaptationniste de la nature des organismes est particulièrement important pour comprendre également la seconde, et dernière, étape que Gould et Lewontin (1979) identifient dans toutes les explications adaptationnistes. Elle consiste, en effet, à invoquer une sorte d'« argument de dernier recours », dont il serait possible de se servir chaque fois que l'on ne parviendrait à identifier aucune fonction pour laquelle le trait que l'on est en train d'étudier pourrait être considéré comme ayant été conçu de manière optimale. Cet argument consiste, par conséquent, à reconnaître le fait

qu'un organisme ne peut pas optimiser chaque partie sans imposer des dépenses aux autres [*'without imposing expenses on others'*]. La notion d'« arbitrage » est introduite et les organismes sont considérés comme étant les meilleurs compromis

³²⁰ Comme l'observait encore une fois Lewontin (1978), l'évolution de la morphologie humaine peut être considérée comme étant globalement « néoténique » (« *neotenic* »), dans la mesure où les traits morphologiques des hommes adultes ressemblent généralement davantage à ceux que développent les grands singes dans la phase de l'enfance qu'aux traits que présentent ces derniers à l'âge adulte, de même que la morphologie infantile chez l'homme correspond à la morphologie fœtale chez les grands singes. Il semblerait, par conséquent, que les êtres humains se trouvent en permanence dans un stade développemental plus précoce que celui dans lequel se trouvent leurs parents évolutifs les plus proches. Le seul caractère phénotypique qui semble échapper à la règle de la néoténie humaine est précisément le menton, qui se développe bien davantage chez les hommes que chez les grands singes, quel que soit le stade développemental que l'on considère. C'est ainsi que « toutes les tentatives d'expliquer la croissance du menton humain comme étant un phénomène d'adaptation spécifique, en vertu duquel il aurait été sélectionné pour qu'il se développe davantage, n'ont pas du tout été convaincantes [*'attempts to explain the human chin as a specific adaptation selected to grow larger failed to be convincing'*]. On a fini par se rendre compte du fait que, du point de vue de l'évolution, le menton n'existe pas ! Il y a deux champs de croissance dans la mâchoire inférieure [*'two growth fields in the lower jaw'*] : le champ dentaire [*'dentary field'*], qui est la structure osseuse de la mâchoire [*'the bony structure of the jaw'*], et le champ alvéolaire [*'alveolar field'*], dans lequel sont insérées les dents [*'in which the teeth are set'*]. Le champ dentaire et le champ alvéolaire présentent tous les deux des traits néoténiques [*'Both the dentary and the alveolar fields do show neoteny'*]. Dans la lignée évolutive humaine, ils sont tous les deux devenus plus petits [que ne le sont dans celle des grands singes]. Le champ alvéolaire a, cependant, rétréci un peu plus rapidement que le champ dentaire, si bien qu'un 'menton' en est apparu comme simple conséquence des taux de régression relatifs de ces deux champs de croissance [*'with the result that a 'chin' appears as a pure consequence of the relative regression rates of the two growth fields'*]. Si l'on reconnaît que le menton est une construction intellectuelle plutôt qu'une unité évolutive [*'the chin is a mental construct rather than a unit in evolution'*], le problème de son explication adaptative disparaît » (Lewontin 1978, p. 217).

[possibles] entre des exigences [adaptatives] concurrentes [*'The notion of 'trade-off' is introduced, and organisms are interpreted as best compromises among competing demands'*] » (Gould & Lewontin 1979, p. 585).

C'est ainsi que, après avoir été évacuée en première approximation, l'interaction entre les parties d'un organisme peut finalement être réintroduite dans le cadre des argumentations adaptationnistes. Elle est néanmoins considérée, tout simplement, comme une contrainte que la structure même d'un organisme impose à l'action de la sélection naturelle – qui est, par conséquent, toujours envisagée comme étant un facteur qui agit sur des traits simples – et non pas comme un ressort potentiel des processus d'adaptation. De surcroît, sa fonction explicative est réduite à celle de rendre compte de la sous-optimalité d'un certain trait en tant que conséquence nécessaire du fait qu'il contribue à réaliser la meilleure conception, ou le meilleur dessin, possible de l'organisme qui le possède, lorsque ce dernier est considéré dans son intégralité. Il en découle que, dans le cadre du programme adaptationniste, la sélection naturelle agissant sur des traits isolés est considérée comme étant, en principe, une « condition suffisante » (« *sufficient condition* ») pour l'explication de l'évolution d'un certain trait phénotypique (Orzack & Sober 1994), que ce dernier soit optimal ou non : dans le premier cas, son évolution s'explique comme étant le résultat d'une pression sélective directe, alors que, dans le second, elle s'explique comme étant le résultat d'un arbitrage entre des pressions sélectives concurrentes, et donc d'une pression sélective indirecte. Néanmoins, du moment que Gould et Lewontin (1979) décrivaient l'approche adaptationniste de l'évolution afin de la critiquer par la suite, dans quelle mesure le portrait qu'ils en dressaient correspondait à la manière dont le définissaient les biologistes qui s'y reconnaissaient ? En quoi le fait de croiser ces différentes perspectives sur la nature du programme adaptationniste pourrait-il nous permettre d'en identifier les principes fondamentaux ? Et en quoi consistaient les objections que Gould et Lewontin (1979) opposaient à de tels principes, afin de les réfuter ?

Le programme adaptationniste – tel que le décrivaient Lewontin (1978), ainsi que Gould et Lewontin (1979) – a été défendu, par exemple, par George C. Williams (1992), qui le définissait comme une stratégie (« *strategy* ») consistant à partir du présupposé qu'« un organisme est d'ores et déjà proche d'un certain niveau maximal d'adaptation réalisable » (« *an organism is already close to some maximum achievable level of adaptation* ») et à essayer de prédire l'évolution de traits de caractères phénotypiques qui ne sont pas encore connus (Williams 1992, p. 5)³²¹. L'on peut tout

³²¹ Plus précisément, Williams (1992) établissait un lien direct entre la stratégie adaptationniste et une vision de la sélection naturelle comme facteur de stabilisation de l'évolution organique, dont les biologistes se servent pour expliquer la stabilité des caractéristiques des espèces d'une génération à l'autre, et donc « la quasi-absence d'évolution » (« *the near absence of evolution* »). Dans une telle perspective, la sélection naturelle est conçue comme étant « un système de

d'emblée remarquer que la description de la stratégie adaptationniste qu'offrait Williams (1992), en la défendant, ressemble à celle qu'en donnaient Gould et Lewontin (1979), afin de la critiquer, dans la mesure où tous les trois regardaient une telle stratégie comme consistant en deux volets. Plus précisément, le premier des deux volets que repérait Williams (1992) a trait à l'étude de la « conception » (« *design* ») d'un caractère et consiste à présupposer que l'adaptation devrait être définie en termes de conformité à des normes de conception *a priori*. Tout comme Gould et Lewontin (1979), Williams (1992) insistait sur le fait qu'il faudrait mettre en relation la stratégie adaptationniste avec une attitude d'ingénieur, qui en constituerait ainsi un présupposé fondamental, dans la mesure où l'adaptation d'un certain caractère phénotypique y est conçue comme étant sa conformité apparente à « des normes de conception *a priori* » (« *a priori design specifications* ») (Williams 1992, p. 40). Dans une telle perspective, il serait possible de considérer, par exemple, l'évolution de l'œil comme étant le résultat d'un processus d'adaptation, visant à résoudre des problèmes liés à la vision, pour la simple raison que la morphologie de l'œil, en tant qu'organe sensoriel, est conforme aux mêmes normes de conception qu'un ingénieur pourrait s'attendre à identifier dans la façon dont a été construit un instrument optique. De surcroît, de telles considérations s'appliquent également à des phénomènes d'adaptation dont la nature fonctionnelle est bien plus subtile que celle d'organes tels que l'œil ou la main, comme, par exemple, la compensation de dosage génétique (« *dosage compensation* ») chez la drosophile. Hermann Joseph Muller (1948)³²² a, en effet, pu présenter un tel phénomène comme étant le résultat d'un processus d'adaptation

réroaction corrective qui favorise les individus qui se rapprochent le plus de la meilleure forme d'organisation disponible pour leur niche écologique » (« *a system of corrective feedback that favors those individuals that most closely approximate some best available organization for their ecological niche* ») (Williams 1992, p. 5). Plus généralement, Williams (1992) contextualisait une telle vision de la sélection naturelle (et donc, par conséquent, ce qu'il appelle la stratégie adaptationniste) dans le cadre d'une analyse historico-philosophique des trois « piliers doctrinaux » (« *doctrinal bases* ») qui ont rendu possible l'avancement du savoir biologique au cours du XX^e siècle, du moins à son avis, à savoir « le mécanisme (par opposition au vitalisme), la sélection naturelle (comme procédé par tâtonnements, par opposition à l'idée d'un plan rationnel) et l'historicité » (« *mechanism (as opposed to vitalism), natural selection (trial and error, as opposed to rational plan), and historicity* »), que Williams (1992) définissait comme étant « la reconnaissance du rôle de la contingence historique dans la détermination des propriétés du biote terrestre » (« *the recognition of the role of historical contingency in determining properties of the Earth's biota* ») (Williams 1992, p. 3).

³²² Plus précisément, Muller (1948) présentait l'effet de compensation de dosage génétique comme étant un exemple de « correction adaptative » (« *adaptive precision* »). Un tel phénomène avait été, en effet, observé en comparant les effets de dosage de gènes localisés sur le chromosome sexuel *X* – et donc de gènes pour lesquels les femelles possédaient deux doses, alors que les mâles en possédaient une – comme, par exemple, le gène mutant qui est associé au trait de caractère « yeux couleur abricot » chez la drosophile. L'on avait donc pu observer que, même si la couleur des yeux variait de manière quasiment proportionnelle à la quantité des doses que possédait chaque individu aussi bien chez les femelles que

en vue de canaliser des patrons de développement similaires [*'canalizing similar development'*] chez les mâles et les femelles, car son action vise précisément, à de nombreux égards, à surmonter les effets divergents des différences de ploïdie entre mâles et femelles sur leurs patrons de développement respectifs [*'ways to overcome developmentally divergent effects of male-female differences in ploidy'*] (Williams 1992, p. 40).

Le second volet qu'identifiait Williams (1992) tient à l'étude de la sélection naturelle comme mécanisme d'optimisation des traits que peut manifester un caractère phénotypique donné, lorsque ces derniers sont conçus comme autant de variations possibles des paramètres de la conception du caractère en question. Dans une telle perspective, la sélection naturelle est donc envisagée comme étant un mécanisme d'« optimisation de paramètres » (« *parameter optimization* »). Ce second volet consisterait ainsi à affirmer la thèse d'après laquelle

la sélection naturelle agissant sur la variation d'un caractère quantitatif (soit-il un paramètre relatif à la conception d'un organe ou un paramètre relatif à une stratégie comportementale) [*'Natural selection acting on variation in a quantitative character (parameter of a design or strategy)'*] fixe la valeur moyenne de ce même caractère près de l'*optimum* fonctionnel et minimise toute variation autour de cette moyenne [*'to minimize the variation about that mean'*] » (Williams 1992, p. 61).

chez les mâles, la couleur du mâle ordinaire, qui possédait une seule dose du gène mutant en question – comme ce dernier est localisé sur le chromosome X –, était très proche de celle de la femelle ordinaire, qui possédait, en revanche, deux doses de ce même gène. De plus, l'on avait également constaté que la couleur des yeux d'une femelle à une dose du gène en question était considérablement plus pâle que celle des yeux d'un mâle à une dose, de même que la couleur des yeux d'une femelle à deux doses était plus pâle que celle des yeux d'un mâle, génétiquement modifié, à deux doses. Il en découle qu'une seule dose du gène mutant qui est associé à des yeux couleur abricot chez le mâle de drosophile semblait avoir une efficacité qui était très proche de celle qu'avaient deux doses de ce même gène chez la femelle. Muller (1948) en avait donc conclu qu'il existerait des ensembles de gènes, qu'il appelait les « correcteurs » (« *correctors* »), dont l'une des fonctions secondaires serait d'ajuster le niveau d'expression d'autres gènes, et notamment de gènes qui sont localisés sur les chromosomes sexuels, en modifiant leur effet de dosage. Dans le cas des gènes liés aux chromosomes sexuels, une telle correction a donc l'effet de mitiger les différences physiologiques qu'implique le fait de posséder deux copies du chromosome X au lieu d'en posséder une seule, ce qui peut apporter, dans certaines conditions, des avantages adaptatifs. La fonction des gènes correcteurs était ainsi expliquée par Muller (1948), de manière générale, comme étant une adaptation « de second degré » (« *second-order* »), c'est-à-dire comme étant le résultat de l'action de la sélection naturelle sur des avantages minimes, qui dériveraient de l'ajustement de l'expression de certains gènes alors que cette dernière est généralement proche de son niveau de saturation.

Dans le cadre de la stratégie adaptationniste, en conséquence, la sélection naturelle peut être conçue comme un mécanisme d'optimisation (« *optimization* ») qui corrige la variation phénotypique afin de produire des traits de caractères phénotypiques qui soient « optimisés » (« *optimized* ») par rapport aux conditions de vie des organismes qui les possèdent, mais non pas forcément « optimaux » (« *optimal* ») dans un sens absolu.

Dans une optique d'optimisation, les traits constituant les différentes formes que peut prendre un seul et même caractère phénotypique sont ainsi conçus comme autant de paramètres (« *parameters* ») alternatifs qui relèvent d'une seule et même conception (« *design* »). Alors que la conception de tel ou tel organe, de tel ou tel programme développemental, de tel ou tel comportement, etc. est, en tant que telle, un « [héritage] du passé » (« *[legacy] from the past* »), et donc le produit de l'histoire phylogénétique et ontogénétique d'un organisme donné, elle peut être affectée par la sélection naturelle de deux manières différentes. D'une part, la sélection naturelle « peut ajuster le nombre relatif de conceptions mutuellement exclusives jusqu'à ce qu'elles atteignent un équilibre dépendant de la fréquence, où une seule conception exclut souvent les conceptions alternatives » (« *can adjust the numbers of mutually exclusive designs until they reach frequency-dependent equilibria, often with only one design that excludes alternatives* »). D'autre part, elle peut également « optimiser les paramètres d'une conception de manière à maximiser la valeur de *fitness* que l'on peut atteindre par le biais de cette dernière dans les conditions présentes » (« *optimize a design's parameters so as to maximize the fitness attainable with that design under current conditions* ») (Williams 1992, p. 56). Afin de clarifier cette distinction conceptuelle, l'on peut prendre en considération un exemple qu'évoquait Williams (1992) lui-même, c'est-à-dire celui des déterminants évolutifs du « sexe-ratio » (« *sex ratio* »)³²³ dans les populations humaines. D'une part, toujours dans une optique

³²³ Le sexe-ratio se définit comme étant le rapport entre le nombre des mâles qui sont présents parmi les effectifs d'une population donnée et le nombre des femelles au sein de cette même population (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 260). Dans les espèces, telles que l'espèce humaine, où le sexe est déterminé par le système (des chromosomes sexuels) XY, les gamètes que produisent les mâles par méiose ont une probabilité égale d'hériter d'un chromosome X ou d'un chromosome Y. Il faudrait donc s'attendre à observer, dans de telles espèces, un sexe-ratio qui soit toujours proche de 1 : 1, c'est-à-dire un mâle pour chaque femelle. Néanmoins, il existe des espèces où le sexe est déterminé par un système de chromosomes XY, mais où le sexe-ratio est biaisé en faveur d'un sexe ou de l'autre, voire où les parents peuvent ajuster le sexe-ratio de leur progéniture. Par exemple, les « femelles de la paruline des Seychelles [*Seychelles warbler*] (*Acrocephalus sechellensis*) engendrent une progéniture qui est constituée jusqu'à 87% par de filles [*produce up to 87 percent daughters*'], lorsque les conditions sur leurs territoires sont favorables, mais seulement à 23% par des filles [*but only 23 percent daughters*'], lorsque les conditions y sont défavorables. Ce changement dans le sexe-ratio [*This shift in the sex ratio*'] est considéré comme étant adaptatif parce que les filles aident parfois leurs parents à élever plus d'enfants lorsque le territoire offre assez de nourriture pour subvenir aux besoins de tous [*when the territory has enough food to support*

adaptationniste, l'on peut considérer le dimorphisme sexuel, en tant que caractère phénotypique, comme étant en lui-même une conception, visant à résoudre le problème évolutif de la reproduction, qui est le résultat d'une forme de « sélection dépendante de la fréquence » (« *frequency-dependent selection* »)³²⁴ ; d'autre part,

les paramètres de masculinité et de féminité [*parameters of maleness and femaleness*'], comme le degré de développement des caractères sexuels secondaires [*degree of development of secondary sex characters*'], seraient sélectionnés de manière à optimiser des arbitrages entre les avantages liés à l'accouplement, les coûts d'alimentation et de viabilité, ainsi que d'autres facteurs connexes [*selected to optimize trade-offs among mating advantages, nutritive and viability costs, and related factors*'] (Williams 1992, p. 60).

Il en découle que les deux volets du programme adaptationniste que décrivait Williams (1992) – qui correspondent aux différentes étapes que Gould et Lewontin (1979) avaient repérées dans les explications adaptationnistes – se complètent l'un l'autre, comme le démontre l'exemple du dimorphisme sexuel chez les êtres humains, ou encore le fait que, afin d'expliquer la différence entre le concept de paramètre et celui de conception lorsqu'ils sont appliqués au domaine de la biologie, Williams (1992) dressait une analogie entre la conception d'un caractère phénotypique et celle que partagent tous les outils à manche en bois et à lame d'acier (William 1992, p. 56). Si l'on choisissait des valeurs différentes pour les paramètres qui les caractérisent, écrivait Williams (1992),

il pourrait s'agir d'un couteau, d'un tournevis ou de bien d'autres types d'outils – de bien d'autres, mais non pas de tous les autres [*many other kinds of tool – many, but not all*']. La contrainte de la lame fixe [*The fixed-blade constraint*'] empêcherait d'en faire une perceuse à engrenages [*a drill with meshing gears*']. La contrainte imposée par la présence du bois et de l'acier [*The wood-and-steel constraint*']

them all']. Bien que le mécanisme à la base de ce changement ne soit pas connu, cette espèce de paruline montre que les chromosomes sexuels ne verrouillent pas toujours le sexe-ratio de telle sorte qu'il y ait un nombre égal de femelles et de mâles [*Although the mechanism behind the shift is not known, this warbler does show that sex chromosomes do not always lock in the sex ratio to equal numbers of females and males*'] » (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 260).

³²⁴ Comme l'expliquent Futuyma et Kirkpatrick (2017), la sélection dépendante de la fréquence se produit « lorsque les valeurs sélectives [ou valeurs de *fitness*] des allèles changent en fonction de leurs propres fréquences [*depending on their own frequencies*']. Dans certains cas, un certain allèle peut obtenir un avantage de valeur sélective lorsqu'il est rare [*an allele gets a fitness advantage when it is rare*'], si bien que l'on appelle une telle situation *dépendance négative de la fréquence* [*negative frequency dependence*'] » (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 122-123).

excluait que l'on puisse s'en servir comme d'une lentille manuelle [*'as a hand lens'*]
(Williams 1992, p. 56).

Un exemple concret de l'utilité d'une telle analogie est représenté par l'analyse de la « base fonctionnelle » (« *functional basis* ») de l'évolution de l'œil qu'a proposée Dan-E. Nilsson (2013), et que l'on pourrait qualifier, justement, d'« adaptationniste ». L'une des premières étapes de ce processus, écrit ce dernier, « a dû consister dans l'apparition d'une réaction chimique dépendante de la lumière qui était couplée à un système de signalisation » (« *must have been the appearance of a light-dependent chemical reaction coupled to a signaling system* ») (Nilsson 2013, p. 5). En témoigne, par exemple, le fait que, dans tous les embranchements du règne animal à l'exception des placozoaires³²⁵ et des éponges, des protéines transmembranaires à 7 domaines appartenant à la famille des opsines sont utilisées précisément à cet escient, c'est-à-dire dans le cadre de cascades de signalisation complexes visant à traduire l'information lumineuse en changements de l'activité de canaux ioniques contrôlés par des nucléotides cycliques – tels que la guanosine monophosphate cyclique, *cGMP* – ou de celle de canaux modulés par un potentiel récepteur transitoire (Plachetzki *et al.* 2007 ; Porter *et al.* 2011 ; Feuda *et al.* 2012 ; Schnitzler *et al.* 2012)³²⁶. Néanmoins, l'émergence de l'œil en tant qu'organe dont la fonction consiste à rendre possible la vision spatiale a nécessité

³²⁵ Les placozoaires constituent « un embranchement [*'phylum'*] qui est modelé sur *Trichoplax adhaerens*, un petit organisme multicellulaire [*'a small, multicellular organism'*] qui a été découvert pour la première fois en 1883 dans un aquarium marin de Naples ; deux autres espèces ont été découvertes depuis lors. *T. adhaerens* est plat, amiboïde [*'flat, amoeboid'*], d'un diamètre de 2 à 3 mm, et possède une couche dorsale et ventrale de cellules ciliées [*'a dorsal and ventral layer of ciliated'*] (*cilium*), entre lesquelles se trouve une couche de cellules contractiles libres [*'a layer of loose, contractile cells'*]. Il pond des œufs et se reproduit également par fission et par bourgeonnement [*'by fission and budding'*]. Sa teneur en ADN [*'DNA content'*] est inférieure à celle de tout autre animal » (Allaby 1999, p. 415).

³²⁶ Dans l'œil des vertébrés, de telles cascades prennent la forme suivante. La lumière excite deux types différents de cellules photoréceptrices, à savoir les bâtonnets et les cônes, qui répondent à des *stimulus* lumineux d'intensités spécifiques : les premiers répondent mieux à la lumière tamisée, alors que les seconds répondent mieux à la lumière brillante, ce qui les rend particulièrement adaptés à la perception des couleurs. Plus précisément, « la lumière active la rhodopsine [une macromolécule dont la composante principale est précisément l'opsine], qui active la protéine *G* 'transducine' [en libérant l'une des sous-unités qui la constituent] [*'light activates rhodopsin, which activates the G protein transducin'*]. La sous-unité α de la transducine, [ainsi] libérée, active une enzyme phosphodiesterase qui hydrolyse la [guanosine monophosphate cyclique,] *cGMP* [*'The freed α subunit of transducin activates a cGMP phosphodiesterase'*], qui abaisse la concentration de *cGMP* et ferme donc les canaux ioniques dépendants de la *cGMP* dans le segment externe du neurone [*'closes cGMP-dependent ion channels in the outer segment of the neuron'*]. L'hyperpolarisation du bâtonnet ou du cône qui en résulte [*'the resulting hyperpolarization of the rod'*] transmet le signal au neurone suivant, dans la voie de transduction [*'the next neuron in the pathway'*], et, en dernière instance, au cerveau » (Nelson & Cox 2008, p. 469).

d'ultérieures altérations d'une telle structure primordiale, comme, par exemple, « le développement de photorécepteurs neuronaux spécialisés [*'specialized photoreceptor neurons'*] qui soient capables de contenir d'importantes quantités d'opsine [*'substantial quantities of opsin'*]... [,] leur association avec un pigment de criblage pour générer la directionnalité de la vision [*'the association with screening pigment to generate directionality'*] (Arendt *et al.* 2009 ; Nilsson 2009) », ainsi que leur organisation en palettes de photorécepteurs constituant des rétines capables de focaliser la lumière (Nilsson 2013, p. 5). Mais quelles ont donc été, se demande Nilsson (2013), les forces qui ont guidé la transition de la photosensibilité, en tant que propriété biochimique, à la vision spatiale, en tant que fonction physiologique ?

Dans le modèle explicatif que développe Nilsson (2013), représenté dans le schéma à la figure (11), les éléments moteurs de l'évolution de l'œil à partir d'un simple système de signalisation dépendant de la lumière ont été les incréments de valeur sélective, ou valeur de *fitness*, causés par les comportements que les organismes possédant les organes qui ont, tour à tour, émergé aux différents stades d'une telle évolution ont pu élaborer sur la base des informations visuelles qu'ils avaient pu acquérir par le biais de ces mêmes organes. Cela signifie qu'un tel processus évolutif

commencerait alors par une variation génétique qui provoque une variation de la structure et de la fonction sensorielles [*'by genetic variation that causes variation in sensory structure and function'*], ce qui rend, à son tour, possible une variation du comportement qui repose sur l'information sensorielle [*'allows for variation in the behavior that relies on the sensory information'*], ce qui entraîne finalement le changement de valeur sélective [ou valeur de *fitness*] [*'the change in fitness'*] sur lequel peut agir la sélection naturelle (Nilsson 2013, p. 5).

Il en découle que, dans un tel modèle explicatif, la conception de l'œil humain, en tant que système de signalisation dépendant de la lumière, peut être vue comme étant le résultat d'une longue histoire évolutive puisque la composante la plus basilaire de sa structure (l'opsine) est largement répandue dans tous les embranchements du règne animal. De plus, c'est précisément une telle composante qui définit



Figure 11 : Schéma causal de l'évolution de l'œil en tant que processus d'adaptation visant à résoudre le problème de la perception visuelle (Nilsson 2013, p. 6)

l'espace des fonctions possibles de l'œil, si bien que ce dernier peut être utilisé comme organe sensoriel dépendant de stimulus lumineux, au sens large du terme, mais non pas comme organe locomoteur, etc. Son fonctionnement spécifique est, en revanche, le produit d'un processus d'évolution ultérieur, qui peut s'expliquer comme étant le résultat de l'optimisation des paramètres qui définissent l'œil humain – par opposition à l'œil d'autres animaux ou à un système de signalisation photosensible qui serait, pour ainsi dire, « plus générique » – qu'a effectuée la sélection naturelle, précisément dans la mesure où elle a eu l'occasion d'agir sur des différences de *fitness* qui avaient été causées par l'adoption de tel ou tel comportement, guidé par la vision, parmi un certain nombre d'options alternatives. C'est pourquoi, en définitive, le modèle de Nilsson (2013) exemplifie précisément l'analogie que dressait Williams (1992) entre la conception des caractères d'un organisme et celle des outils à manche en bois et à lame d'acier. À partir d'une telle analogie, l'on peut donc en déduire que l'effet des contraintes structurelles qu'un organe donné hérite de son histoire évolutive est d'en fixer la conception générale, c'est-à-dire de délimiter l'espace de ses fonctions possibles, alors que sa fonction précise est déterminée par les valeurs de ses différents paramètres, qui sont optimisées, toujours dans une optique adaptationniste, par l'action de la sélection naturelle. L'approche d'ingénieur qui sous-tend le programme adaptationniste permet, par conséquent, d'identifier l'ensemble des contraintes qui constituent les conditions nécessaires, mais non suffisantes, afin que telle ou telle fonction spécifique puisse être attribuée à tel ou tel caractère phénotypique. L'approche d'optimisation des paramètres qui constitue l'autre fondement de ce même programme permet, en revanche, d'identifier précisément les caractéristiques qui définissent la fonction spécifique de tel ou tel caractère parmi toutes ses fonctions possibles. Il en découle que la conjonction desdites caractéristiques avec les contraintes que représentent les normes de spécification de la conception du caractère en question détermine l'ensemble des conditions qui sont « conjointement suffisantes » pour rendre compte de la fonction qu'on a attribuée à ce dernier. C'est justement dans un tel sens que les deux approches qui sont au fondement du programme adaptationniste se complètent mutuellement. Mais quels sont donc les principes que l'on peut déduire de la manière dont Gould et Lewontin (1979), ainsi que Williams (1992) présentaient les étapes qui structurent les explications adaptationnistes ?

Par généralisation, il est possible d'en déduire au moins deux principes fondamentaux, qui constitueraient ainsi le squelette conceptuel du programme adaptationniste et dont le premier est ce qu'on pourrait appeler un principe d'« isolement fonctionnel ». Ce dernier consiste, en effet, à affirmer que le trait d'intérêt doit être isolé de tous les autres traits de caractères qui constituent le phénotype de l'organisme qui le possède, afin que l'on puisse en déterminer la fonction. Dans un tel contexte, la fonction d'un trait est conçue comme étant l'une des réponses possibles à un défi

environnemental temporellement et spatialement localisé, et donc comme étant un effet contribuant à la valeur de *fitness* de l'organisme qui le possède dans le contexte de ses conditions de vie actuelle. En d'autres termes, un tel principe repose à la fois sur une vision réductionniste – dans l'acception du terme qu'on a précisée plus haut – de l'organisme, ainsi que sur une conception « évolutive » de la fonction d'un trait phénotypique isolé que l'on peut facilement rapprocher de ce que Peter Godfrey-Smith (1994) a appelé une définition du concept de fonction du point de vue de l'« histoire récente » (« *modern history* ») du trait en question. Plus précisément, une telle définition se situe dans la droite lignée de l'analyse « étiologique » (« *etiological* ») de ce même concept qu'a développée Larry Wright (1973)³²⁷ et consiste à affirmer que « les fonctions biologiques sont les dispositions ou les effets d'un trait de caractère qui en expliquent le maintien, dans un temps récent, sous l'action de la sélection naturelle » (« *dispositions or effects a trait has which explain the recent maintenance of the*

³²⁷ La définition du concept de fonction que donnait Wright (1973) se résume au schéma suivant : affirmer que la fonction de *X* est *Z* signifie affirmer que « (a) *X* existe parce qu'il fait *Z* [*'X is there because it does Z'*] ; (b) *Z* est une conséquence (ou un résultat) de l'existence de *X* [*'Z is a consequence (or result) of X's being there'*] » (Wright 1973, p. 161). La condition (a) exprime ainsi ce que Wright (1973, p. 161) appelait la « forme étiologique » (« *etiological form* ») des explications fonctionnelles (ou attributions de fonctions), dans la mesure où la conjonction « parce que » (« *because* ») doit être comprise dans un sens étiologique, c'est-à-dire comme indiquant les raisons pour lesquelles *X* « en est arrivé à exister » (« *got to be there* ») dans les conditions données. Cela permet ainsi de distinguer la fonction d'un objet, d'une propriété, etc. de ses conséquences accidentelles : « La boucle de ceinture, le cœur, le nez, l'écrou du moteur, et ainsi de suite n'existent pas *parce qu'*ils arrêtent les balles, ils palpitent, ils servent de supports aux lunettes, ils ajustent la valve, et toutes les autres choses qui leur ont été respectivement attribuées, de manière fautive, comme fonctions. On [ne peut pas] faire appel à ces pseudo-fonctions pour expliquer comment ces choses *en sont arrivées* à être là » (« *The buckle, the heart, the nose, the engine nut, and so forth were not there because they stop bullets, throb, support glasses, adjust the valve, and all the other things which were falsely attributed as functions, respectively. Those pseudo functions could not be called upon to explain how those things got there* ») (Wright 1973, p. 156). (a) constitue, par conséquent, une condition nécessaire afin que l'on puisse attribuer la fonction *Z* à *X*, mais non pas une condition suffisante. Comme le remarquait Wright (1973) lui-même, il est possible de donner une forme étiologique à des explications qui ne sont pas fonctionnelles, mais causales dans le sens commun du terme. « Quand nous disons que *Z* est la fonction de *X* [*'Z is the function of X'*] », poursuivait Wright (1973), « nous ne disons pas seulement que *X* existe parce qu'il fait *Z*, nous disons aussi que *Z* est (se produit parce qu'il est) un résultat ou une conséquence de l'existence de *X* [*'Z is (or happens as) a result or consequence of X's being there'*]. Non seulement la chlorophylle est présente chez les plantes *parce qu'*elle leur permet d'effectuer la photosynthèse, mais la photosynthèse est une *conséquence* de l'existence de la chlorophylle [*'photosynthesis is a consequence of the chlorophyll's being there'*] » (Wright 1973, p. 160). Cela signifie que, afin de pouvoir attribuer la fonction *Z* à *X*, il faut également identifier un certain nombre de conditions en vertu desquelles quelques propriétés de *X* peuvent être considérées comme étant nécessaires, au sens faible de « non redondantes » (« *non-redundant* »), pour que l'effet *Z* se produise. Il en découle que, selon Wright (1973), toute explication fonctionnelle reposerait, en dernière analyse, sur une forme de circularité (« *convolution* ») logique (*Z* explique « fonctionnellement » *X* parce que *X* explique « causalement » *Z*), ce qui est explicité par la condition (b) (Wright 1973, p. 261).

trait under natural selection ») (Godfrey-Smith 1994, p. 344). En conséquence, il s'agit d'une conception « historico-évolutive » de la fonction d'un trait phénotypique donné parce qu'elle fait dépendre toute attribution d'un rôle fonctionnel de considérations qui portent sur le passé de ce même trait. Néanmoins, il s'agit également d'une conception « du point de vue de l'histoire récente », car elle considère que la partie de l'histoire d'un trait de caractère qui est pertinente pour en expliquer la fonction consiste précisément dans son passé récent (Godfrey-Smith 1994). Comme le remarque Godfrey-Smith (1994) lui-même, telle est précisément la manière dont l'on conçoit la fonction d'un trait de caractère phénotypique dans le cadre du programme adaptationniste. Le second principe, que l'on pourrait qualifier de « principe d'optimalité », affirme, en revanche, qu'il faut considérer tout trait de caractère phénotypique comme étant optimal, voire comme ayant été optimisé par l'action de la sélection naturelle, par rapport à la fonction évolutive qu'on lui a attribuée. Mais qu'est-ce que cela signifie, dans le cas d'un caractère phénotypique, que d'être optimal, ou optimisé ? Comme l'observent S. H. Orzack et Elliott Sober (1994), contrairement à l'approche « génético-populationnelle » (« *population-genetic* ») de l'adaptation (qui envisage cette dernière comme étant le produit d'un certain mode de sélection, dont l'identification consiste à déterminer un mécanisme génétique sous-jacent), l'approche d'« analyse d'optimalité » (« *optimality analysis* ») se fonde sur le présupposé que les phénotypes adaptés sont des phénotypes « évolutivement stables » (« *evolutionary stable* »). Un tel présupposé a été formulé par John Maynard Smith *et al.* dans une série de travaux fondateurs – Maynard Smith & Price (1973) ; Maynard Smith (1982) ; Parker & Maynard Smith (1990) – et consiste à affirmer que le phénotype d'un individu

est optimal (par rapport à une variété d'alternatives) [*'optimal (relative to a variety of alternatives)'*] parce qu'il est plus efficace que les autres phénotypes et se traduit donc par une valeur de *fitness* plus élevée [*'it outperforms the other phenotypes and thereby results in a higher fitness'*]...En conséquence, d'autres phénotypes sont éliminés de la population (ou presque) ou bien sont empêchés de l'envahir [*'prevented from invading'*] (Orzack & Sober 1994, p. 361-362)³²⁸.

³²⁸ Dans leur article sur la logique du conflit animal, John Maynard Smith et George Price (1973) définissent le concept de « stratégie évolutivement stable » (« *evolutionary stable strategy* ») – qu'ils empruntent à la théorie des jeux, d'une part, ainsi qu'aux travaux de R. H. MacArthur (1965) et de William D. Hamilton (1967) sur l'évolution du sexe-ratio, d'autre part – de la manière suivante : « une stratégie telle que, si la plupart des membres d'une population l'adoptent, il n'y a aucune stratégie 'mutante' qui permette d'augmenter la valeur de la *fitness* reproductive [des éventuels individus qui la choisiraient] » (« *a strategy such that, if most of the members of a population adopt it, there is no 'mutant' strategy that would give higher reproductive fitness* ») (Maynard Smith & Price 1973, p. 15).

La raison d'être de ce présupposé consiste ainsi dans l'idée que, si un certain trait phénotypique recouvre une grande importance pour le succès évolutif de l'individu qui le possède, la sélection naturelle finira par surmonter toute contrainte génétique ou développementale qui s'opposera au maintien de ce même trait. Il en découle que la stabilité de ce dernier pourra finalement être considéré comme étant, précisément, un indice relativement fiable de son importance (Orzack & Sober 1994, p. 362). De plus, comme les traits phénotypiques auxquels s'intéressent les biologistes qui adoptent régulièrement une approche d'analyse d'optimalité – tels que, par exemple, les « comportements d'approvisionnement en nourriture » (« *feeding behaviors* ») ou le sexe-ratio – sont clairement liés au succès évolutif, l'adoption d'un tel présupposé paraît, à leurs yeux, pleinement justifiée (Orzack & Sober 1994, p. 362). Dans une telle perspective, la fonction d'un trait phénotypique – c'est-à-dire les dispositions ou les effets de ce même trait que l'on a identifiés comme étant fonctionnels – est telle justement parce qu'elle amène à la maximisation de la valeur de *fitness* de l'individu qui le possède. Par conséquent, la valeur de *fitness* est conçue comme étant une fonction, au sens mathématique du terme, d'une certaine propriété quantifiable de ce même individu (le succès reproducteur lui-même, ou encore des propriétés étroitement corrélées à ce dernier, telles que, par exemple, l'apport énergétique d'un certain comportement d'approvisionnement en nourriture, etc.), dont on peut supposer qu'elle se trouve dans un rapport causal avec le trait d'intérêt.

De surcroît, une telle approche de l'adaptation est étroitement liée à la conception de la sélection naturelle comme condition suffisante pour expliquer l'évolution d'un trait phénotypique dont il était question plus haut. Plus précisément, Orzack et Sober (1994) présentent l'analyse d'optimalité comme étant une manière de tester empiriquement une telle conception par le biais de « modèles censurés » (« *censored models* »), c'est-à-dire de modèles qui prennent en considération un seul facteur causal (le cas échéant, la sélection naturel), en faisant abstraction de tous les autres. Les modèles d'optimalité, écrivent Orzack et Sober (1994), affirment qu'

il n'y a pas eu de pression de mutation, que la dérive génétique n'a pas significativement entravé la dynamique de sélection ou la réalisation de l'*optimum* par les individus [*'did not significantly interfere with selective dynamics or with the attainment of the optimum by individuals'*], et ainsi de suite. Si les prédictions de ce modèle sont cohérentes avec les observations dans un sens statistique du terme [*'If the predictions of this model fit the observations in a statistical sense'*]³²⁹ (Orzack & Sober 1994, p. 363),

³²⁹ Comme le précisent Orzack et Sober (1994) eux-mêmes, la définition d'un ensemble de critères statistiques « relatifs à la correspondance entre les prédictions et les données » (« *relating to the fit between predictions and data* ») est

alors l'hypothèse que la sélection naturelle serait une condition suffisante afin que l'on puisse rendre compte de l'évolution du trait en question peut être considérée comme vraie. Au contraire, si les prédictions du modèle s'écartent significativement des données observées, une telle hypothèse doit être tenue pour fautive. Néanmoins, comme nous l'avons observé plus haut, de tels écarts entre les prévisions d'un modèle d'optimalité et les données observées sont souvent expliqués par l'existence d'arbitrages entre des pressions sélectives concurrentes. Plus précisément, comme le remarque Huneman (2017),

les arbitrages peuvent s'effectuer tout d'abord entre des pressions sélectives [*'between selective pressures'*], comme une pression sélective pour afficher peu de couleurs afin d'éviter les prédateurs [*'a selective pressure to display few colors in order to avoid predator'*] et une pression de sélection sexuelle, qui découle de la préférence des femelles pour une couleur visible [*'a sexual selection pressure, which stems from the preference of females toward conspicuous color'*]. Deuxièmement, les arbitrages peuvent s'effectuer entre les traits eux-mêmes [*'between the traits themselves'*]. Par exemple, si la sélection optimise la course de vitesse [*'if selection optimizes the speed race'*], en considérant les prédateurs comme une pression sélective, elle va aussi augmenter les coûts payés par un autre trait, par exemple l'efficacité métabolique ou la robustesse des pattes [*'metabolic efficiency or limb robustness'*] (Huneman 2017, p. 74).

Il en découle ainsi que l'adaptationnisme est toujours un « adaptationnisme par arbitrages » (« *trade-off adaptationism* »), et notamment par « arbitrages de *fitness* qui représentent le fait que les traits d'un organisme sont intégrés [*'the traits of an organism are integrated'*] et que, de ce fait, la sélection ne peut faire évoluer de nouvelles valeurs d'un trait donné que si les autres traits des organismes ne sont pas trop perturbés [*'under the condition that other traits of the organisms are not too much hindered'*] » (Huneman 2017, p. 74) par un tel changement. Le second principe qui structure le

nécessaire pour distinguer la « mise à l'épreuve qualitative » (« *qualitative test* ») d'un certain modèle adaptationniste de sa « mise à l'épreuve quantitative » (« *quantitative test* ») : « Dans le second cas de figure, l'investigateur détermine si les prédictions numériques du modèle sont quantitativement précises [*'whether the model's numerical predictions are quantitatively accurate'*] (c'est-à-dire si elles correspondent aux valeurs numériques que l'on peut inférer des données, compte tenu de quelques hypothèses *standard* sur la nature et l'étendue d'éventuelles erreurs d'échantillonnage [*'given standard assumptions about the nature and extent of sampling error'*]). Par exemple, dans le cas [d'un biais du sexe-ratio qui serait favorable aux femelles], l'on pourrait déterminer si l'intervalle de confiance de la moyenne des données à 95% recouvre [la valeur numérique] de la prédiction [*'one could determine whether the 95% confidence interval of the average of the data encompasses the prediction'*] » (Orzack & Sober 1994, p. 367).

programme adaptationniste est, par conséquent, moins un principe d'optimalité qu'un « principe de sous-optimalité », ce qui rend autrement plus complexe la vérification empirique des prédictions qu'il est possible de tirer dans le périmètre du cadre que définit ce même programme. Mais quelle est donc la valeur épistémique d'un tel principe ? En d'autres termes, en quoi influencerait-il sur la manière dont le programme adaptationniste est susceptible de rendre compte des processus évolutifs ?

Pour leur part, Gould et Lewontin (1979) affirmaient très clairement qu'un tel principe constituerait l'un des facteurs qui empêcheraient la biologie de l'évolution d'avancer plus rapidement vers une représentation plus objective des phénomènes qu'elle étudie, c'est-à-dire qu'il constituerait ce que l'on pourrait qualifier, pour utiliser une expression empruntée à Gaston Bachelard (1938), d'« obstacle épistémologique »³³⁰. C'est pourquoi les critiques qu'ils adressaient au programme adaptationniste se concentraient justement, du moins dans un premier temps, sur ce second principe. Plus précisément, Gould et Lewontin (1979) allaient jusqu'à comparer ce dernier aux arguments empreints d'optimisme métaphysique que, dans le conte philosophique intitulé *Candide ou l'optimisme*, Voltaire (1759) prête au personnage du Docteur Pangloss, comme lorsque ce dernier commente la destruction de la ville de Lisbonne par un séisme (événement qui a véritablement eu lieu le 1^{er} novembre 1755) en s'exclamant que « tout ceci est ce qu'il y a de mieux. Car, s'il y a un volcan à Lisbonne, il ne pouvait être ailleurs. Car il est impossible que les choses ne soient pas où elles sont. Car tout est bien » (Voltaire 1759, p. 24). Le programme adaptationniste, affirmaient Gould et Lewontin (1979, p. 585), serait, en effet, « véritablement panglossien » (« *truly Panglossian* ») dans la mesure où il semble reposer sur le principe que tout trait phénotypique doit nécessairement remplir la fonction qu'il remplit précisément puisque « il est impossible que les choses ne soient pas où elles sont », car, bien que le monde tel qu'il existe ne soit pas « optimal » dans un sens abstrait du terme, il faut croire que la sélection naturelle aurait façonné les organismes de la meilleure manière possible, compte tenu des contraintes physiques qui leur sont imposées et des conditions de départ. Une telle critique se justifierait, toujours à leurs yeux, par le fait que les deux volets du programme adaptationniste finiraient par engendrer des « styles d'argumentation » qui ne seraient rien d'autre

³³⁰ Il faut rappeler ici que, aux yeux de Bachelard (1938), la connaissance objective consisterait dans une forme de connaissance abstraite (dans le sens où elle a dépassé toute vision première et intuitive de la réalité), dont l'objet est « factice » (c'est-à-dire qu'il est fabriqué par les scientifiques eux-mêmes à la suite d'une série d'approximations successives du réel, qui sont elles-mêmes conduites par le biais de modèles théoriques et de dispositifs expérimentaux) et qui est soumise à une forme de « contrôle social ». Pour ne citer qu'un exemple, « l'ordre de précision croissante » de toute mesure physique, écrivait Bachelard (1938), « est un ordre d'instrumentalisation croissante, donc de socialisation croissante » (Bachelard 1938, p. 288).

qu'autant de manières d'expliquer des phénomènes par des histoires *ad hoc*³³¹, ou « histoires comme ça » (« *just-so stories* »), ce qui rendrait de telles explications irréfutables quasiment par principe. Cela est dû notamment au fait que, premièrement, « la réfutation d'une histoire adaptative conduit généralement à son remplacement par une autre histoire adaptative, plutôt qu'à la suspicion qu'un autre type d'explication pourrait être nécessaire » (« *the rejection of one adaptive story usually leads to its replacement by another, rather than to a suspicion that a different kind of explanation might be required* »), et que, deuxièmement, « les critères d'acceptation d'une histoire [de ce genre] sont si vagues que beaucoup d'entre elles sont admises sans avoir été adéquatement confirmées » (« *the criteria for acceptance of a story are so loose that many pass without proper confirmation* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 587-588). Gould et Lewontin (1979) en déduisaient ainsi que l'approche adaptationniste de l'évolution favoriserait le foisonnement d'explications qui sont simplement plausibles, c'est-à-dire compatibles avec nos meilleures connaissances sur le fonctionnement de la sélection naturelle, et non pas l'identification de critères qui permettent d'isoler, parmi toutes les trajectoires évolutives possibles, celles qui semblent être les plus pertinentes pour rendre compte des raisons qui ont amené un certain groupe d'organismes à développer les caractéristiques qu'ils présentent. C'est ainsi que, comme nous l'avons vu plus haut, le programme adaptationniste représentait, aux yeux de Gould et Lewontin (1979), non pas une manière de faire progresser la biologie de l'évolution, mais un frein à son développement, et cela pour deux raisons spécifiques : premièrement, il conduirait les biologistes à écarter des explications non adaptationnistes, mais parfaitement viables, en exerçant ainsi une contrainte dogmatique sur leurs argumentations et en se rapprochant, en cela, du « pansélectionnisme » d'August Weismann (1868, 1875, 1876, 1909) et d'Alfred Russel Wallace (1899) plutôt que du pluralisme épistémique revendiqué par Darwin (1859) lui-même (Gould & Lewontin 1979, p. 589-590) ; deuxièmement, si on l'interprétait d'un point de vue adaptationniste, la théorie de l'évolution risquerait de se muer en une « théorie qui ne saurait jamais échouer lorsqu'elle est examinée de manière rigoureuse » (« *a theory that cannot fail in careful study* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 589), comme le démontrerait la discussion autour des

³³¹ Plus précisément, Gould et Lewontin (1979) identifient quatre styles différents : 1) « Si un argument adaptatif se solde par un échec, essayez-en un autre » (« *If one adaptive argument fails, try another* ») ; 2) « Si un argument adaptatif se solde par un échec, supposez qu'il doit en exister un autre ; une version plus faible du premier argument » (« *If one adaptive argument fails, assume that another must exist ; a weaker version of the first argument* ») ; 3) « En l'absence d'un bon argument adaptatif en premier ressort, attribuez cet échec à une compréhension imparfaite des conditions dans lesquelles vit un organisme et de ce qu'il fait » (« *In the absence of a good adaptive argument in the first place, attribute failure to imperfect understanding of where an organism lives and what it does* ») ; 4) « Mettez l'accent sur l'utilité immédiate du trait en question à l'exclusion d'autres caractéristiques morphologiques » (« *Emphasize immediate utility and exclude other attributes of form* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 586-587).

expériences menées par David P. Barash (1976) sur l'agressivité chez les mâles de merlebleu azuré des montagnes³³². C'est pourquoi Gould et Lewontin (1979, p. 590) ne se limitaient pas à critiquer le

³³² Plus précisément, Barash (1976) avait utilisé un modèle de mâle de merlebleu (*Sialia currucoides*), qu'il avait placé près de deux nids pendant que les mâles étaient en quête de nourriture, afin de pouvoir observer la manière dont ces derniers réagiraient à la présence de cet intrus à leur retour. Il avait répété une telle expérience trois fois, une fois avant que les œufs n'eussent été pondus et deux fois après cette date. Ce faisant, il avait pu observer que les épisodes d'agressivité des mâles, à la fois envers l'intrus et envers leurs partenaires, avaient rapidement diminué après la ponte des œufs. Il en avait donc conclu qu'un tel patron d'agressivité était l'indice de l'existence d'une stratégie évolutive visant à limiter les risques d'infidélité. Une telle explication, écrivait-il, est conforme « aux attentes que l'on peut former sur la base de la théorie de l'évolution [*'consistent with the expectations of evolutionary theory'*]. Ainsi, l'agressivité envers un mâle envahisseur [*'aggression toward an intruding male'*] (le modèle) serait de toute évidence particulièrement avantageuse au début de la saison reproductive [*'especially advantageous early in the breeding season'*], lorsque les territoires et les nids sont normalement défendus... L'agressivité initiale en réponse à la partenaire femelle est également adaptative [*'The initial, aggressive response to the mated female is also adaptive'*] au sens où, compte tenu d'une situation suggérant une probabilité élevée d'adultère [*'given a situation suggesting a high probability of adultery'*] (c'est-à-dire la présence du modèle près de la femelle) et en supposant que des femelles de remplacement soient disponibles, le fait d'obtenir une nouvelle partenaire [en chassant l'ancienne] permettrait d'améliorer la valeur de *fitness* du mâle [*'enhance the fitness of the male'*]... La diminution de l'agressivité des mâles envers les femelles au cours des périodes d'incubation et d'éclosion pourrait être imputée à l'impossibilité d'être cocu après que les œufs ont été pondus [*'the impossibility of being cuckolded after the eggs have been laid'*]... Les résultats sont conformes à une interprétation évolutive [*'the results are consistent with an evolutionary interpretation'*] » (Barash 1976, p. 1099-1100 ; cité par Gould & Lewontin 1979, p. 588). Gould et Lewontin (1979) objectaient, néanmoins, que les résultats des expériences de Barash (1976) étaient certainement compatibles avec une interprétation adaptationniste d'un tel phénomène, mais ils l'étaient également avec une explication alternative, non adaptationniste, que Barash (1976) avait balayée d'un revers de main sans même la tester : « Le mâle revient à deux ou trois reprises, s'approche du modèle, le tâte un peu, le reconnaît comme étant le même imposteur qu'il a vu auparavant, et ne dérange pas sa femelle. Pourquoi ne pas faire au moins l'expérience la plus flagrante qui permettrait de tester cette alternative à une histoire adaptative conventionnelle [*'Why not at least perform the obvious test for this alternative to a conventional adaptive story'*] : présenter pour la première fois le modèle au mâle après la ponte des œufs » (Gould & Lewontin 1979, p. 588). De plus, lorsque Morton *et al.* (1978) avaient répliqué les expériences de Barash (1976) en choisissant une autre espèce de merlebleus et en y apportant quelques modifications (y compris l'introduction d'un modèle de femelle), dans l'espoir de confirmer les conclusions qu'avait pu tirer ce dernier, ils avaient fini par les réfuter. Cependant, remarquaient Gould et Lewontin (1979), « au lieu de remettre en question l'histoire [adaptationniste] choisie par Barash [(1976)] [*'calling Barash's selected story into question'*], ils en proposent tout simplement une autre, qu'ils ont eux-mêmes conçue afin de présenter aussi bien leurs résultats que ceux de Barash [(1976)] sous un jour adaptationniste [*'they merely devise one of their own to render both results in the adaptationist mode'*]. Peut-être, supposent-ils, les femelles de remplacement sont rares dans l'espèce qu'ils ont étudiée et abondantes dans celle qu'a étudiée Barash [(1976)] » (Gould & Lewontin, p. 589), ce qui pourrait rendre compte des discrepances entre leurs résultats respectifs, tout en sauvant l'approche adaptationniste dans sa globalité. C'est précisément pourquoi

principe d'optimalité, mais ils proposaient également ce que l'on pourrait appeler une « typologie partielle » de principes explicatifs qui sont alternatifs à l'adaptation par sélection naturelle, mais non pas moins darwiniens pour autant.

Premièrement, avançaient-ils, le polymorphisme génétique au sein d'une seule et même population ainsi que les différences génétiques entre les espèces s'expliquent plus adéquatement, dans certains cas, comme étant le produit de « processus stochastiques de modification de la fréquence des gènes par dérive génétique aléatoire » (« *stochastic process of change in gene frequency by random genetic drift* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 590), y compris par effet fondateur, qui peuvent conduire à la fixation d'allèles différents dans des populations distinctes même en l'absence de toute pression de sélection³³³, voire contre toute sorte de pression sélective³³⁴. Deuxièmement, l'évolution de certains traits phénotypiques peut s'expliquer comme n'étant due ni à l'adaptation, ni même à la sélection naturelle, mais à une quelque forme de corrélation entre ces mêmes traits et d'autres qui font effectivement l'objet d'une pression sélective, à savoir à un phénomène de pléiotropie, d'allométrie, de « compensation matérielle » (« *material compensation* ») (Rensch 1959) ou à des corrélations résultant de contraintes mécaniques, au sens de D'Arcy Thompson (1942)³³⁵ (Gould & Lewontin

Gould et Lewontin (1979) considéraient que les histoires adaptationnistes risqueraient de devenir tout simplement irréfutables.

³³³ « La taille des populations est limitée et les populations isolées qui constituent la première étape du processus de spéciation [*'the isolated populations that form the first step in the speciation process'*] sont souvent fondées par un très petit nombre d'individus. En raison de cette restriction de la taille de la population, la fréquence des allèles change par *dérive génétique*, une sorte d'erreur aléatoire d'échantillonnage génétique [*'a kind of random genetic sampling error'*] » (Gould & Lewontin 1979, p. 590).

³³⁴ Des conditions telles que, par exemple, la présence de faibles coefficients de sélection (s), dont l'ordre de grandeur est, par exemple, égal à l'inverse de la taille de la population ($\frac{1}{N}$) – comme dans le cas où un caractère métrique, tel que la forme, le métabolisme ou le comportement, est déterminé par l'effet agrégé d'un grand nombre de gènes – peuvent amener à la fixation d'allèles sous-optimaux, voire délétères, et donc contrecarrer l'action de la sélection naturelle (Gould & Lewontin 1979, p. 590-591).

³³⁵ Par exemple, lorsqu'il décrivait la forme conique et pointue des œufs de guillemot (*Synthliboramphus*), D'Arcy Thompson (1942) s'interrogeait sur les causes possibles d'une telle conformation. En effet, cette dernière est parfois décrite comme étant un phénomène d'adaptation, par sélection naturelle, aux conditions dans lesquelles les femelles de guillemot pondent leurs œufs, c'est-à-dire un œuf à la fois, sur d'étroites corniches de rocher. Dans de telles circonstances, la forme conique est avantageuse car elle rend l'œuf moins susceptible de tomber de la corniche qu'il ne le serait s'il était de forme sphérique. Néanmoins, remarquait D'Arcy Thompson (1942), la forme conique n'est pas l'apanage des œufs de guillemot, car elle caractérise également les œufs d'autres espèces d'oiseaux, tels que les pluviers (*Charadriinae*), dont les comportements de nidification sont fort différenciés. L'on pourrait donc supposer que la forme conique des œufs de guillemot et d'autres oiseaux serait la conséquence non pas d'une pression sélective, mais de la contrainte mécanique constituée par le fait que plusieurs œufs de grande taille sont entassés sous le corps d'une seule et même femelle d'oiseau.

1979, p. 591). Troisièmement, il faut garder à l'esprit que la sélection et l'adaptation ne vont pas nécessairement de pair. Par exemple, comme l'observait Lewontin (1979) dans un autre article qui était paru la même année,

une mutation qui double la fécondité des individus se propagera dans une population donnée de manière rapide [*'sweep through a population rapidly'*]. S'il n'y a pas eu de changements dans l'efficacité avec laquelle les ressources sont utilisées [*'no change in efficiency of resource utilization'*], les individus ne laisseront pas plus de descendants qu'auparavant, mais pondront simplement deux fois plus d'œufs [*'simply lay twice as many eggs'*], puisque la progéniture en excès mourra à cause de la limitation des ressources [*'the excess dying because of resource limitation'*] (Lewontin 1979 ; cité par Gould & Lewontin, p. 592).

La sélection naturelle favorisera ainsi les individus les plus féconds, comme elle le fait toujours. Cependant, en concluait Lewontin (1979), les choses étant ainsi, en quoi pourra-t-on affirmer que « les individus ou la population dans son ensemble sont-ils mieux adaptés qu'auparavant ? » (« *In what sense are the individuals or the population as a whole better adapted than before ?* ») (Lewontin 1979 ; cité par Gould & Lewontin, p. 592). Dans d'autres cas encore, tels que celui de l'influence des courants marins sur la morphologie des éponges ou des coraux, la « bonne conception » (« *good design* ») de certains traits organiques peut être attribuée à des facteurs purement phénotypiques (Gould & Lewontin 1979, p. 592). Notamment, remarquaient, encore une fois, Gould et Lewontin (1979), il est possible de considérer l'adaptation, définie comme étant « la bonne adéquation des organismes à leur environnement » (« *the good fit of organisms to their environment* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 592), comme étant un phénomène aux causes multiples, qui se situeraient à trois niveaux hiérarchiques différents, si bien que « la simple existence d'une bonne adéquation entre l'organisme et l'environnement n'est pas une preuve suffisante pour en déduire » la présence d'une quelque forme d'adaptation due à l'action de la sélection naturelle (« *The mere existence of a good fit between organism and environment is insufficient evidence for inferring the action of natural*

D'Arcy Thompson (1942) en concluait que, « quelle que soit la véritable nature de ces adaptations apparentes aux conditions existantes, ce n'est que par une logique très hâtive que nous pouvons les accepter comme étant une *vera causa*, c'est-à-dire comme une explication adéquate des faits. Et il est évident que, dans l'exemple que nous offre l'œuf de cet oiseau, nous trouvons un argument admirable en faveur de la nécessité d'étudier directement la signification mécanique ou physique de la forme de celui-ci » (« *Whatever truth there be in these apparent adaptations to existing circumstances, it is only by a very hasty logic that we can accept them as a vera causa or adequate explanation of the facts ; and it is obvious that in the bird's egg we have an admirable case for direct investigation of the mechanical or physical significance of its form* ») (D'Arcy Thompson 1942, p. 396).

selection ») (Gould & Lewontin 1979, p. 593). Plus précisément, un premier niveau de causalité serait constitué par les adaptations physiologiques, c'est-à-dire les adaptations non hérissables qui résultent de « la plasticité phénotypique qui permet aux organismes de modeler leur forme en fonction des circonstances qui prévalent pendant l'ontogenèse » (« *the phenotypic plasticity that permits organisms to mould their form to prevailing circumstances during, ontogeny* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 592), telles que les adaptations aux conditions de haute altitude chez l'homme. Le deuxième niveau serait celui de l'adaptation culturelle, que Gould et Lewontin (1979) qualifiaient de « forme 'hérissable' d'adaptation non darwinienne » (« *'heritable' form of non-Darwinian adaptation* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 592) chez les hommes et chez d'autres espèces sociales avancées, alors que le troisième serait précisément celui de l'adaptation au sens « adaptationniste » du terme, c'est-à-dire de l'adaptation comme effet de l'action du mécanisme darwinien de sélection naturelle sur la variation génétique, que l'on pourrait envisager, par conséquent, comme constituant seulement un tiers des toutes les adaptations que l'on peut observer dans la nature.

Finalement, Gould et Lewontin (1979) identifiaient également un quatrième et un cinquième principe explicatif qui sont alternatifs à ceux qui caractérisent l'approche adaptationniste. D'une part, il arrive, en effet, que des populations d'organismes apparentés, voire des sous-populations d'organismes conspécifiques, apportent des solutions différentes aux mêmes problèmes adaptatifs. En termes théoriques, cela se traduit par l'existence de « paysages adaptatifs » (« *adaptive landscapes* »)³³⁶ où chaque population occupe un pic de *fitness* distinct, si bien qu'il est impossible d'identifier un *optimum* adaptatif de manière univoque. D'autre part, l'adaptation peut consister dans l'« utilisation secondaire de parties qui sont [déjà] présentes pour des raisons d'architecture

³³⁶ Le « paysage adaptatif » est une métaphore visuelle qu'a originairement proposée Sewall Wright (1932), dans le but de représenter graphiquement les trajectoires évolutives que peut suivre une population donnée, ou un individu donné, dans le cadre de sa « théorie évolutive de l'équilibre fluctuant » (« *Shifting balance theory of evolution* »). Plus précisément, « Wright a dressé une analogie [*'analogized'*] entre... [la carte topographique d'] un paysage physique et une surface dont les contours représentaient des différences de valeurs de *fitness* [*'differences in fitness'*]. Cette surface de *fitness* [*'fitness surface'*] reposait sur les nombreuses combinaisons possibles de gènes qui pourraient être réalisées [*'the many different possible gene combinations that might be realized'*]. En reprenant des représentations qui étaient bien connues grâce aux cartes topographiques, les topographies de valeurs de *fitness* [*'fitness topographies'*] de Wright étaient ponctuées de sommets et de vallées [*'peaks and valleys'*] qui correspondaient [respectivement] à des valeurs adaptatives élevées et à des valeurs adaptatives faibles [*'high and low adaptive value'*]. Il serait donc possible de situer des populations ou des individus sur de telles surfaces de *fitness* et l'action de la sélection naturelle, qui pousserait et tirerait sur leurs caractéristiques spécifiques [*'the action of selection pushing and pulling on their different features'*], nous aiderait à en déterminer les trajectoires [évolutives] au fil du temps [*'determine their trajectories over time'*] » (Dietrich & Skipper Jr. 2012, p. 3).

[morphologique], de développement ou d'histoire [évolutive] » (« *secondary utilization of parts present for reasons of architecture, development or history* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 593)³³⁷. Il en découle, par conséquent, que le concept même d'« utilité » (« *utility* ») d'un trait phénotypique pour l'organisme qui le possède n'a pas toujours de signification univoque. Et quand bien même il en aurait une, il faudrait croire que l'utilité immédiate d'un trait ne constituerait pas forcément un bon indicateur des raisons qui sont susceptibles d'en expliquer l'évolution. Gould et Lewontin (1979) ne se limitaient, cependant, pas seulement à remettre en question le second des deux principes du programme adaptationniste que nous avons identifiés plus haut (c'est-à-dire le principe d'optimalité), à partir des options alternatives que nous venons d'énumérer, mais ils en critiquaient également le premier (c'est-à-dire le principe d'isolement), et cela sur la base d'une considération de nature historique. Plus précisément, ils observaient que le penchant à découper le phénotype d'un organisme donné en parties isolées – afin de rendre compte des propriétés de chacune d'entre elles comme si elles étaient le résultat d'un processus d'adaptation directe à l'environnement – aurait constitué l'un des traits caractéristiques de la biologie anglo-américaine, alors que les biologistes de l'Europe continental auraient historiquement été plus enclins à considérer les structures des organismes comme constituant des plans d'organisation (« *Baupläne* ») cohérents. Dans une telle perspective, l'origine d'un plan d'organisation ne se réduirait pas à un phénomène d'adaptation, de même que le seul concept d'adaptation ne saurait expliquer la transition d'un plan d'organisation à un autre (Gould & Lewontin 1979, p. 593). Gould et Lewontin (1979) distinguaient, néanmoins, entre une version faible et une version forte de cette alternative « européenne » à l'adaptationnisme, que l'on pourrait qualifier de « structuraliste » ou de « systémique ». La première consisterait dans l'orthogénisme affiché que défendaient des théoriciens tels qu'Otto Schindewolf (1950), Adolf Remane (1971) et Pierre-Paul Grassé (1977), alors que la seconde s'opposerait à l'isolement fonctionnel des traits d'un organisme donné et au principe d'optimalité non pas au nom d'une force organisatrice inconnue, mais sur la base du présupposé que « les plans d'organisation anatomique fondamentaux des organismes sont tellement intégrés et tellement chargés de contraintes qui s'imposent à leur adaptation [*so integrated*

³³⁷ C'est précisément dans le but de mieux décrire de tels phénomènes que Gould lui-même et Elisabeth S. Vrba (1982) ont fini par forger, par la suite, le concept d'« exaptation » (« *exaptation* »). Plus précisément, ils ont utilisé ce terme pour désigner « des traits phénotypiques qui remplissent convenablement leur rôle actuel [*are fit for their current role*'], et donc *aptus*, mais qui n'ont pas été conçus pour un tel usage [*were not designed for it*'], et ne sont par conséquent pas *ad aptus*, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas été poussés vers une certaine valeur sélective [*pushed towards fitness*']. Ils doivent leur valeur sélective à des propriétés qui existent pour d'autres raisons [*They owe their fitness to features present for other reasons*'], et sont par conséquent convenables à leur rôle [*fit*] (*aptus*) en raison de [*by reason of*] (*ex*) leur forme, ou *ex aptus* » (Gould & Vrba 1982, p. 6).

and so replete with constraints upon adaptation'] » – ce qui renvoie au troisième et au cinquième principe explicatif de la typologie alternative dressée par Gould et Lewontin (1979) eux-mêmes – « que les styles d'argumentation qui caractérisent le programme sélectionniste n'expliquent pas grand-chose d'intéressant à leur égard » (« *that conventional styles of selective arguments can explain little of interest about them* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 594).

En conséquence, d'après les positions que défendaient Gould et Lewontin (1979), alors que la version forte d'une telle conception structuraliste ou systémique de l'évolution, comme alternative au programme adaptationniste et sélectionniste, ferait appel à une sorte de mysticisme – ce qui justifierait le fait qu'elle ait été ignorée de l'autre côté de l'Atlantique –, sa version faible se fonderait sur une objection proprement scientifique à l'adaptationnisme, d'après laquelle les formes d'organisation propres au vivant s'expliqueraient précisément non pas par un processus d'adaptation, mais sur la base de « normes universelles dont l'existence n'est envisageable que dans les conditions systémiques qui définissent une organisation complexe en tant que telle » (« *through universal requirements which can only be expected under the systems conditions of complex organization itself* ») (Riedl 1977 ; cité par Gould & Lewontin 1979, p. 594). Une telle critique, poursuivaient-ils, ne peut pas être balayée d'un revers de main, d'autant plus qu'elle trouve son fondement dans un concept qui est accepté par tous les évolutionnistes, c'est-à-dire le concept d'inertie phylogénétique . D'après un tel concept, incarné, par exemple, par la distinction entre « habitus » (« *habitus* ») et « héritage » (« *heritage* ») qu'avait dressée William K. Gregory (1922)³³⁸, les possibilités d'adaptations d'un organisme donné sont limitées par les conditions dans lesquelles s'est constitué le plan d'organisation qui le caractérise : c'est pourquoi le fait que les mollusques ne puissent pas voler, ou encore le fait qu'il n'existe pas de mouches qui soient aussi grandes que des éléphants s'expliquent généralement par les contraintes que l'histoire phylogénétique de tels organismes a imposées à leurs capacités d'adaptation (Gould & Lewontin 1979, p. 594). Néanmoins, Gould et Lewontin (1979) évoquaient également un autre type de contraintes, qu'ils considéraient comme constituant un sous-ensemble des contraintes phylétiques, c'est-à-dire les contraintes développementales qui empêchent les premières étapes du processus ontogénétique de varier considérablement sous l'effet des facteurs évolutifs, en raison du fait que, surtout chez les organismes complexes, les mécanismes de différenciation des divers systèmes d'organes, ainsi que leur intégration dans le cadre d'un corps physiologiquement fonctionnel, sont des processus très sensibles aux erreurs, si petites soient-elles. C'est pourquoi ils

³³⁸ Plus précisément, Gregory (1922) distinguait les « caractéristiques qui ont été acquises par le truchement des habitudes de vie actuelles » (« *those features which have been acquired during the present life habits* »), c'est-à-dire ce qu'il appelait « *habitus* », des caractéristiques « qui ont été héritées des habitudes de vie antérieures » (« *which have been inherited from previous life habits* »), c'est-à-dire de ce qu'il appelait « *heritage* » (Gregory 1922, p. 106).

estimaient que les contraintes développementales « peuvent exercer le plus haut niveau de contrôle sur toutes les possibles trajectoires évolutives » (« *may hold the most powerful rein of all over possible evolutionary pathway* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 594), si bien qu'il serait possible d'interpréter les lois embryologiques fondamentales de Karl Ernst von Baer (1828) et la loi biogénétique d'Ernst Haeckel (1866)³³⁹ comme n'étant rien d'autre que des tentatives, plus ou moins fructueuses, de reconnaître le fait que les stades précoces du développement sont « à la fois hautement conservés [au cours de l'évolution] et fortement contraignants pour les stades successifs » (« *both highly conservative and strongly restrictive of later development* ») (Gould 1977 ; Gould & Lewontin 1979, p. 594). En conséquence, c'était précisément eu égard à une telle intégration fondamentale du plan d'organisation des organismes que Gould et Lewontin (1979) pouvaient affirmer que le principe d'isolement fonctionnel sur lequel se fonde, comme nous venons de le montrer, le programme adaptationniste n'est pas à même de rendre compte des processus qui sont à la base de la modification évolutive des différents *Baupläne*, c'est-à-dire d'expliquer un pan important de l'histoire évolutive

³³⁹ Comme le remarque Lynn K. Nyhart (2009), Karl Ernst von Baer « rejetait l'idée de l'existence d'une échelle unique conduisant de la monade à l'homme [*'a single scale from monad to man'*], et soutenait au contraire la position de Georges Cuvier, le principal zoologiste français, selon laquelle il existait quatre types d'organisation fondamentaux et distincts dans le règne animal [*'four basic and distinct kinds of organization in the animal kingdom'*] (appelés 'Types' par von Baer et 'Embranchements' par Cuvier). De plus, du point de vue de von Baer, le développement s'interprétait comme étant un processus de différenciation progressive dont chaque étape coïncidait avec la gradation des groupes classificatoires, de plus en plus restreints, auxquels appartenait un individu donné [*'a successive process of differentiation that paralleled the successively smaller classificatory groups to which an individual belonged'*]. L'embryon présentait d'abord les caractéristiques du type des vertébrés [*'the characteristics of the vertebrate Type'*], puis celles de sa classe [*'class'*] (par exemple, la classe des oiseaux), puis celles de son ordre [*'order'*], et ainsi de suite jusqu'aux caractéristiques propres à l'individu » (Nyhart 2009, p. 203). Quant à la loi biogénétique d'Ernst Haeckel (1866, 1868, 1870), Olivier Rieppel (2016) rappelle que cette dernière doit être replacée dans le contexte de la tentative de transformer la « morphologie » (« *Morphologie* ») en « morphogénie » (« *Morphogenie* »), au sens de « science historique du développement des formes organiques » (« *Entwicklungsgeschichte* »), qu'avait menée ce dernier. Plus précisément, Haeckel (1866, 1868, 1870) identifiait deux branches d'une telle science, à savoir l'histoire du développement morphologique des individus, qu'il appelait « ontogénie » (« *Ontogenie* »), et l'histoire du développement morphologique des *phylums* animaux (qui correspondaient à des analogues « dynamiques » et historiques des embranchements de Cuvier ou des types de von Baer), qu'il appelait « phylogénie » (« *Phylogenie* »). C'est ainsi que Haeckel (1866, 1868, 1870) essaya de réinterpréter, dans un sens darwinien, le concept « von-baerien » d'une différenciation progressive des étapes du développement individuel qui serait parallèle à la différenciation hiérarchique des *taxa* auxquels appartenait l'individu en question, ce qui l'amena à la conclusion que « l'ontogénie ou histoire du développement morphologique d'individus physiologiques est très intimement liée à la phylogénie ou histoire du développement morphologique des tribus généalogiques (*phylums*) », c'est-à-dire que « l'ontogénie n'est rien d'autre qu'une récapitulation abrégée de la phylogénie » (« *Ontogeny is nothing but an abbreviated recapitulation of phylogeny* ») (Rieppel 2016, p. 50-51).

de la vie. C'est ainsi que l'analyse que faisaient Gould et Lewontin (1979) de ce qu'on a appelé ici le « principe d'optimalité » a fini par se traduire par une critique généralisée du programme adaptationniste.

Mais à quoi se résumait, donc, une telle critique ? En quoi pourrait-on la relier à la thèse, qu'a formulée Gould (1980b, 1983, 2002) lui-même, du « durcissement » de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, et donc également de la théorie synthétique qui en est issue ? En quoi nous permettrait-elle de mieux comprendre les liens que l'on peut établir entre la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution, telle qu'elle s'est développée sur la base des modèles mathématiques de la génétique théorique des populations, et la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, telle qu'elle s'est construite entre les années 1930 et les années 1950 ?

1.2.2 La théorie (synthétique) de l'évolution de Theodosius Dobzhansky et de Sewall Wright : un triomphe de l'adaptationnisme ?

La critique du programme adaptationniste qu'ont développée Gould et Lewontin (1979) sur la base de leurs analyses de ceux que nous avons appelés le « principe d'isolement » et le « principe d'optimalité » consiste donc à affirmer une double thèse. Premièrement, il s'agit d'affirmer une thèse épistémologique qui a trait à la validité des principes fondamentaux de l'adaptationnisme et qui s'articule en trois points : 1) Gould et Lewontin (1979) considéraient que le programme adaptationniste reposerait sur une conception étroite de l'adaptation qui inviterait à rendre compte d'un trait donné uniquement sur la base de l'utilité immédiate qu'un organisme aurait pu en retirer, et donc à reléguer au second plan toute considération sur le rôle qu'auraient pu jouer des contraintes phylétiques ou environnementales. Les problèmes que pose l'explication de la fonction des membres antérieurs du *Tyrannosaurus rex* constituent des exemples paradigmatiques des limites d'une telle approche. En effet, si la structure de ces membres avait représenté une véritable innovation évolutive, observaient Gould et Lewontin (1979, p. 587), l'on serait justifié de croire que son origine ne tiendrait qu'à son utilité adaptative, bien que cette dernière soit difficile à identifier. Néanmoins, les membres antérieurs du tyrannosaure ne sont rien d'autre que les homologues réduits de membres plus longs, que l'on peut trouver chez des ancêtres du tyrannosaure lui-même et dont l'utilité fonctionnelle peut être identifiée sur la base de critères tout à fait conventionnels. Un tel processus de réduction, poursuivaient Gould et Lewontin (1979), ne nécessiterait donc aucune explication adaptative, dans la mesure où il « est probable qu'il s'agisse d'un corrélatif développemental des champs allométriques qui sont responsables de l'augmentation relative de la taille de la tête et des membres postérieurs »

(« *a developmental correlate of allometric fields for relative increase in head and hindlimb size* ») (Gould & Lewontin 1979, p. 587) du tyrannosaure par rapport à celle de la tête et des membres desdits ancêtres. Contrairement aux hypothèses adaptationnistes sur l'utilité secondaire des membres antérieurs du tyrannosaure, une telle explication non adaptative « peut être testée par des méthodes allométriques conventionnelles » (« *can be tested by conventional allometric methods* ») et c'était précisément pour une telle raison que Gould et Lewontin (1979, p. 587) la considéraient comme étant plus fructueuse ; 2) une conception de l'adaptation telle que celle qui sous-tend le programme adaptationniste amènerait, par conséquent, à établir un lien de causalité directe entre l'adaptation elle-même et l'action de la sélection naturelle, alors que, comme le démontrerait la typologie d'explications alternatives qu'avaient dressée Gould et Lewontin (1979, p. 590-593) eux-mêmes, les relations entre ces deux phénomènes seraient bien plus complexes. Il en découle que le programme adaptationniste impliquerait ce que les deux auteurs présentaient comme étant une vision « panglossienne » de l'évolution, d'après laquelle la sélection naturelle engendrerait une sorte d'« harmonie préétablie » entre les différents caractères qui constituent la structure globale d'un organisme, tout en agissant sur chacun d'entre eux de manière individualisée ; 3) cette vision panglossienne de l'évolution aurait pour résultat de légitimer toute sorte de récit adaptationniste, en rendant une telle modalité explicative quasiment infalsifiable. De plus, elle favoriserait également la mise à l'écart de toute approche alternative, comme, par exemple, celle qu'avait prônée le paléontologue allemand Adolf Seilacher (1970), qui visait précisément à mettre en valeur le rôle joué par des contraintes « architecturales » (« *bautechnisch* ») dans la construction de la morphologie d'un organisme donné (Gould & Lewontin 1979, p. 595). De telles contraintes, observaient encore une fois Gould et Lewontin (1979, p. 595),

ne découlent pas d'adaptations antérieures qui ont été conservées dans un nouvel environnement écologique [*'not from former adaptations retained in a new ecological setting'*] (comme les contraintes phylétiques [*'phyletic constraints'*] au sens habituel du terme), mais se manifestent sous la forme de limitations architecturales qui n'ont jamais été des adaptations [*'as architectural restrictions that never were adaptations'*], mais plutôt des conséquences nécessaires des matériaux et des conceptions [*'the necessary consequences of materials and designs'*] qui ont été sélectionnés pour construire des *Baupläne* fondamentaux (Gould et Lewontin 1979, p. 595).

D'un point de vue épistémologique, la critique que Gould et Lewontin (1979) adressaient au programme adaptationniste était ainsi à la fois négative et positive, en ceci que les deux auteurs ne se limitaient pas à pointer du doigt la nature « panglossienne » de ce dernier, mais ils proposaient

également une approche alternative, qui consistait à considérer les organismes comme étant des unités intégrées et à mettre au jour la fonction créatrice et modificatrice des contraintes phylétiques et développementales. De surcroît, ils illustraient une telle approche par un certain nombre d'exemples, tels que les travaux de Seilacher (1972) sur l'architecture divariquée qui caractérise la morphologie des mollusques³⁴⁰.

Deuxièmement, la thèse que défendaient Gould et Lewontin (1979) au sujet de l'adaptationnisme était également une thèse historiographique, dans la mesure où elle tenait à la place qu'aurait occupée le programme adaptationniste dans l'histoire de la biologie de l'évolution, et notamment à la question de savoir si Charles Darwin (1859, 1869) aurait pu lui-même adhérer à une quelconque version du programme adaptationniste. Plus précisément, Gould et Lewontin (1979) s'en prenaient à l'idée reçue que Darwin (1859, 1869) aurait lui-même été « un sélectionniste radical dans l'âme [*'a radical selectionist at heart'*], qui n'invoquait d'autres mécanismes [explicatifs] que comme solutions de repli [*'only in retreat'*], et seulement à cause de l'ignorance quant aux mécanismes de l'hérédité qui était propre à son époque et qu'il déplorait lui-même [*'as a result of his age's own lamented ignorance about the mechanisms of heredity'*] » (Gould & Lewontin 1979, p. 589), et affirmaient que, de son vivant, Darwin (1859, 1869) avait toujours adopté une approche foncièrement « pluraliste » (« *pluralist* ») des causes des changements évolutifs³⁴¹. Autrement dit, Gould et Lewontin (1979)

³⁴⁰ « Dans un exemple fascinant, Seilacher (1972) a montré que la forme d'architecture divariquée... est présente, encore et toujours, dans tous les groupes de mollusques, ainsi que chez les brachiopodes [*'the divaricate form of architecture... occurs again and again in all groups of molluscs, and in brachiopods as well'*]. Cette forme de base se traduit par une grande variété de structures [*'a wide variety of structures'*] : des lignes ornementales surélevées [*'raised ornamental lines'*] (non pas des lignes de croissance parce qu'elles ne suivent jamais la forme du bord du manteau), des motifs de coloration [*'patterns of coloration'*], des structures internes dans la minéralisation de la calcite [*'internal structures in the mineralization of calcite'*], et des sillons incisés [*'incised grooves'*]. Il ne sait pas ce qui génère ce patron et estime que l'accent qui a traditionnellement et presque exclusivement été mis sur la valeur adaptative de chacune de ses manifestations [*'traditional and nearly exclusive focus on the adaptive value of each manifestation'*] a détourné l'attention de questions qui tiennent à sa genèse dans la croissance des mollusques [*'questions of its genesis in growth'*] et a également empêché de le reconnaître en tant que phénomène général. Ce dernier doit découler d'un certain patron caractéristique d'inhomogénéité dans le manteau en croissance [*'some characteristic pattern of inhomogeneity in the growing mantle'*], et probablement de la génération de patrons d'interférence [*'the generation of interference patterns'*] autour de centres régulièrement espacés ; c'est [précisément] en procédant de cette manière que de simples simulations informatiques peuvent générer la forme en question (Waddington & Cowe 1969). Ce patron général peut ne pas du tout être le résultat d'une adaptation directe » (Gould & Lewontin 1979, p. 595-596).

³⁴¹ Afin d'étayer leur analyse, Gould et Lewontin (1979) citaient des extraits tirés des écrits de Darwin (1869, 1880) lui-même, comme, pour ne faire qu'un exemple, un passage qui était issu de la cinquième édition de *l'Origine des espèces* (1869). En effet, dans une annexe à cette édition de son ouvrage majeur, Darwin (1869) répond directement aux critiques

arguaient du fait que le programme adaptationniste ne constituerait pas un élément essentiel de la théorie darwinienne de l'évolution, mais seulement l'une des possibles interprétations de la démarche originaire de Darwin (1859, 1869). Il s'agirait, plus précisément, d'une interprétation « moniste » (« *monist* ») (Reznick 2010)³⁴² de la vision darwinienne des causes de l'évolution en ceci qu'elle mettrait l'accent sur le rôle de la sélection naturelle, conçue comme étant le facteur principal du changement évolutif. Cet aspect historiographique des critiques que Gould et Lewontin (1979) ont adressées au programme adaptationniste est, en conséquence, parfaitement complémentaire à la manière dont Gould (1980b, 1983, 2002) lui-même a fini par concevoir le développement de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, entre les années 1930 et les années 1950. Comme nous l'avons remarqué plus haut, Gould (1983) considérait que la première phase de la Synthèse Moderne – au début des années 1930 – aurait consisté à faire un « plaidoyer pour la connaissabilité et la définissabilité opérationnelle » (« *a plea for knowability and operationality* ») (Gould 1983, p. 74) des phénomènes évolutifs – et notamment des phénomènes macro-évolutifs – sur la base de mécanismes causaux qui étaient compatibles avec la génétique mendélienne, sans pour autant accorder à « la sélection naturelle cumulative qui conduit à l'adaptation » (« *cumulative natural selection leading to adaptation* ») aucune « place d'honneur comme si elle était le mécanisme du changement évolutif » (« *pride of place as the mechanism of evolutionary change* ») (Gould 1983,

qui l'accusait d'avoir réduit l'évolution à la seule action de la sélection naturelle : « Mais puisque mes conclusions ont été récemment fortement dénaturées [*'much misrepresented'*], et qu'on a affirmé que j'attribue exclusivement à la sélection naturelle les modifications des espèces [*'that I attribute the modification of species exclusively to natural selection'*], je dois me permettre de faire remarquer que dans la première édition, aussi bien que dans les suivantes, j'ai reproduit dans la position la plus évidente, – à la fin de l'introduction, – la phrase suivante : 'Je suis convaincu que la sélection naturelle a été le moyen de modification le plus important, *quoique non exclusivement le seul* [*'natural selection has been the main, but not the exclusive means of modification'*]. Mais cela a été en vain [*'to no avail'*] ; car grande est la puissance d'une constante et fausse démonstration ; l'histoire de la science montre heureusement qu'elle ne dure pas longtemps » (Darwin 1869 ; 1873, p. 583 ; cité par Gould & Lewontin 1979, p. 589).

³⁴² Il faut tout de même remarquer, comme le fait Rasmus G. Winther (2012) dans son appréciation critique de la lecture « moniste » de l'*Origine des espèces* qu'a proposée David N. Reznick (2010) – et que l'on pourrait assimiler, du moins partiellement, au versant historiographique du programme adaptationniste –, que le terme « monisme » peut recouvrir, dans un tel contexte, deux acceptions distinctes. D'un point de vue ontologique, il peut renvoyer, justement, au rôle de la sélection naturelle en tant qu'agent principal, voire unique, du changement évolutif. D'un point de vue épistémologique, il peut renvoyer à la réduction de la « théorie de la spéciation » (« *theory of speciation* ») – le principe de divergence – et de la « théorie de l'histoire universelle » (« *theory of universal history* ») – le principe de descendance avec modification – qui font partie intégrante de la théorie évolutive de Darwin (1859) à un troisième aspect de cette dernière, c'est-à-dire une « théorie des mécanismes de variation et d'adaptation » (« *theory of mechanisms of variation and adaptation* »), qui finit donc par être considéré « *pars pro toto* » (Winther 2012, p. 159).

p. 75). Une telle approche des causes de l'évolution aurait donc changé au cours de la seconde phase de la Synthèse Moderne – et notamment au cours des années 1940 – qui se serait caractérisée, toujours aux yeux de Gould (1980b, 1983), par un « durcissement » de ses présupposés ontologiques et méthodologiques, jusqu'à en arriver au « triomphe de l'adaptationnisme » que Gould lui-même et Lewontin (1979) avaient décrit dans leur article sur les écoinçons de Saint Marc. Un exemple en aurait été l'abandon progressif, en faveur d'explications adaptationnistes, du « rôle prédominant » (« *predominant role* ») que plusieurs auteurs avaient attribué – au début de la Synthèse Moderne – à la dérive génétique aléatoire « dans le changement phénotypique, non seulement au niveau des dèmes, mais également dans l'origine de plusieurs espèces » (« *in phenotypic change, not only at the level of demes, but also in the origin of many species* ») (Gould 1983, p. 75). Toujours comme nous l'avons anticipé plus haut, pour étayer une telle analyse de la Synthèse Moderne, Gould (1980b, 1983) s'est concentré sur deux figures principales, à savoir la figure de George Gaylord Simpson (1944, 1953), mais surtout celle de Theodosius Dobzhansky (1937, 1941, 1951). Sa participation aux *workshops* de 1974 l'avait, en effet, persuadé de la place centrale qu'avait occupée *Genetics and the Origin of Species*, au cours de la seconde phase de la synthèse, dans l'élaboration de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel³⁴³. Sur ce point, Gould (1980b, 1983, 2002) rejoignait, ainsi, les positions d'Ernst Mayr (1998c), pour qui les travaux de Dobzhansky (1937) auraient effectivement démontré qu'« il n'y avait pas de conflits entre les découvertes » (« *there was no conflict between the findings* ») des généticiens mendéliens et des naturalistes-évolutionnistes, dans la mesure où « une bonne compréhension de l'évolution » (« *a full understanding of evolution* ») nécessitait la mise en correspondance entre ces deux points de vue (Mayr 1998c, p. xii). Mais en quoi la manière dont les différentes éditions de *Genetics and the Origin of Species* ont été modifiées, au fil du temps, témoignerait-elle d'un durcissement de la Synthèse Moderne, ainsi que de la théorie synthétique qui en est issue, dans un sens adaptationniste ? De quelle manière les thèses défendues par Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) nous permettraient-elles de mieux comprendre en quoi consistent les liens que l'on pourrait identifier entre les modèles mathématiques de la génétique théorique des

³⁴³ « J'avais toujours considéré les livres de la seconde phase [de la synthèse] comme ayant été sur un pied d'égalité [*as coequal*']. Mais les discussions au cours de la conférence ont mis l'accent sur un point fondamental qui m'avait précédemment paru peu clair : la prééminence [*the preeminence*'] du livre de Dobzhansky, paru en 1937, *Genetics and the Origin of Species*. Ce tome n'a pas tout simplement profité de la chance d'avoir été la première publication d'une collection – un *primus inter pares* chronologique, pour ainsi dire [*a temporal primus inter pares, so to speak*']. Le tome de Dobzhansky a constitué une source d'inspiration directe et primordiale [*a direct and primary inspiration*'] pour les livres qui ont suivi. Les orateurs se sont levés les uns après les autres pour déclarer que leur propre contribution à la Synthèse Moderne avait été stimulée par le fait qu'ils avaient précédemment lu le texte de Dobzhansky » (Gould 2002, p. 519).

populations, en tant que fondements de la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution, et la théorie synthétique comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie ? Dans quelle mesure l'établissement de ces mêmes liens se serait-il effectivement concrétisé par l'imposition de contraintes de nature adaptationniste à un tel cadre conceptuel ?

Dans son analyse du développement des vues qu'avait exprimées Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) sur le rôle que jouent la sélection naturelle et les phénomènes d'adaptation dans les processus évolutifs – en tant qu'exemple paradigmatique du durcissement de la Synthèse Moderne au cours des années 1940 et 1950 –, Gould (1983) affirmait que le but de la première édition de *Genetics and the Origin of Species* avait consisté à montrer en quoi il était théoriquement possible d'expliquer les phénomènes évolutifs, à tous les niveaux hiérarchiques, par les biais des « méthodes de la génétique expérimentale » (« *the methods of experimental genetics* ») (Gould 1983, p. 76) – contrairement à ce que soutenait, par exemple, Iurii Filipchenko (1927 ; Adams 1990 ; Alexandrov 2014), c'est-à-dire le mentor même de Dobzhansky – et non pas à établir la légitimité de tel ou tel principe explicatif particulier. Plus précisément, Gould (1983) mettait l'accent sur le fait que Dobzhansky (1937) avait tâché de réfuter l'idée que les phénomènes macro-évolutifs ne pourraient s'expliquer qu'en faisant l'hypothèse de l'existence de mécanismes génétiques particuliers qui échapperaient à la génétique de laboratoire, et non pas d'affirmer le « pouvoir généralisé » (« *pervasive power* ») de la sélection naturelle adaptative en tant que « mécanisme [général] du changement évolutif » (« *mechanism of evolutionary change* ») (Gould 1983, p. 76). C'est pourquoi il considérait l'identité des mécanismes génétiques micro-évolutifs (qui agissent à l'échelle temporelle d'une vie humaine et qui peuvent donc être manipulés en laboratoire) et des mécanismes génétiques macro-évolutifs comme étant une simple « hypothèse de travail » (« *working hypothesis* ») (Dobzhansky 1937, p. 12 ; cité par Gould 1983, p. 76-77) qui serait rendue nécessaire par le fait que les hommes ne disposent que des premiers pour comprendre les seconds. Il en découle que, à la lumière des positions qu'exprimait Dobzhansky (1937) lui-même en 1937, le but d'une théorie synthétique de l'évolution visant à établir des liens logiques et méthodologiques entre la génétique évolutive et la systématique évolutive (c'est-à-dire, justement, entre l'étude des processus micro-évolutifs et celle des processus macro-évolutifs) ne consistait pas à affirmer dogmatiquement une telle identité, mais à en explorer la portée explicative en tant qu'hypothèse heuristique³⁴⁴. Comme nous l'avons anticipé plus haut, une telle attitude aurait,

³⁴⁴ C'est pourquoi, comme l'observait encore une fois Gould (1983), Dobzhansky (1937) s'était attelé à récuser un certain nombre d'objections qui portaient, précisément, sur la possibilité, pour ainsi dire, « *a priori* » de l'hypothèse de l'identité des mécanismes micro-évolutifs et des mécanismes macro-évolutifs, plutôt que sur la validité empirique de cette dernière : 1) contrairement à la variation génétique que l'on peut reproduire en laboratoire, la variation naturelle serait continue (« *continuous* ») et non mendélienne (« *non-Mendelian* ») (Dobzhansky 1937, p. 57 ; Gould 1983, p. 77) ; 2) la variation

néanmoins, changé au fil des éditions successives de *Genetics and the Origin of Species* (Dobzhansky 1941, 1951, 1970), si bien que Gould (1983) avait pu interpréter une telle évolution comme étant le reflet d'une tendance plus générale des biologistes qui s'étaient engagés dans la Synthèse Moderne à se rallier au programme adaptationniste, du moins tel que l'avaient décrit Lewontin (1978 ; Gould & Lewontin 1979) et lui-même. Afin d'étayer cette thèse, il remarquait que, dans la troisième édition de son ouvrage, Dobzhansky (1951) avait fini par supprimer les deux chapitres de la première version du livre qui traitaient plus en détail de variations génétiques « non-adaptatives ou non sélectionnées » (« *nonadaptive or nonselective* ») – notamment de « polyploïdie » (« *polyploidy* ») et de changements chromosomiques (« *chromosomal changes* ») –, bien qu'une partie des informations qui étaient contenus dans ces deux chapitres eût été disséminée dans d'autres sections de l'ouvrage (Gould 1983, p. 78)³⁴⁵. Néanmoins, la différence entre la première et la troisième édition de *Genetics and the Origin of Species* que Gould (1983) considérait comme étant la plus « remarquable » (« *remarkable* »), du point de vue de l'analyse du durcissement de la Synthèse Moderne, était l'interprétation adaptationniste du modèle du « paysage adaptatif » de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) que l'on peut lire dans le tout premier chapitre de l'ouvrage de Dobzhansky (1951). En conséquence, en quoi consisterait une telle interprétation et de quelle manière nous permettrait-elle de répondre à la question de savoir en quoi Dobzhansky (1951) aurait fini par relier la théorie synthétique en tant que

mendélienne ne serait à même d'expliquer que la diversification des *taxa* de rang inférieur (« *taxa of low rank* ») (des races jusqu'aux genres), et non pas celle des *taxa* de rang supérieur (« *higher taxa* »), qui s'expliquerait par des mécanismes génétiques inconnus (Dobzhansky 1937, p. 68 ; Gould 1983, p. 77) ; 3) les changements chromosomiques seraient toujours « destructeurs » (« *destructive* ») et causeraient la « dégénération du matériel génétique » (« *degeneration of stocks* ») (Dobzhansky 1937, p. 83 ; Gould 1983, p. 77) ; 4) les différences entre les *taxa* de rang inférieur seraient « directement induites par l'environnement et n'[auraient] aucune base génétique et évolutive » (« *are directly induced by the environment and have no genetic or evolutionary basis* ») (Dobzhansky 1937, p. 146 ; Gould 1983, p. 77) ; 5) « les expériences de Johannsen sur les lignées pures » (« *Johannsen's experiments on pure lines* ») auraient démontré que la sélection naturelle serait inefficace « en tant que mécanisme évolutif » (« *as a mechanism of evolutionary change* ») (Dobzhansky 1937, p. 150 ; Gould 1983, p. 77) ; 6) la sélection naturelle agirait trop lentement pour produire des changements évolutifs, même « à des échelles de temps géologiques » (« *even in geological time* ») (Dobzhansky 1937, p. 178 ; Gould 1983, p. 77) ; 7) « l'isolement reproductif » (« *reproductive isolation* ») ne saurait s'expliquer par des « principes génétiques » (« *genetic principles* ») (Dobzhansky 1937, p. 255).

³⁴⁵ De plus, observait encore une fois Gould (1983), Dobzhansky (1951) y avait ajouté un nouveau chapitre, entièrement consacré au « polymorphisme adaptatif » (« *adaptive polymorphism* ») (Dobzhansky 1951, p. 108-134 ; Gould 1983, p. 78) et il avait développé une explication adaptationniste d'un phénomène tel que l'« anagenèse » (« *anagenesis* »), qu'il imputait à l'action d'« optimisation » (« *optimizing* ») et de « triage » (« *winning* ») qu'exercerait la sélection naturelle, à l'exclusion de toute influence des « fluctuations environnementales » (« *fluctuating environments* ») (Dobzhansky 1951, p. 283 ; Gould 1983, p. 79).

théorie génétique de l'évolution – car elle est fondée sur les principes de la génétique mendélienne et sur les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations – à la théorie synthétique comme cadre conceptuel, et cela dans une optique adaptationniste ?

Comme première chose, nous pouvons observer que *Genetics and the Origin of Species* a contribué à une synthèse qui a consisté non seulement à établir une *relation logique et méthodologique* entre la génétique évolutive et la systématique évolutive, mais également, de manière plus générale, à mettre en relation un *ensemble de mécanismes causaux* de nature génétique et l'évolution par sélection naturelle, en tant que processus biologique. En conséquence, nous pouvons avancer l'hypothèse que ce serait précisément cette double relation qui constituerait le lien entre la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution et la théorie synthétique comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie qu'est parvenu à établir Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970). Cela dit, de quelle manière ce dernier aurait-il réussi à obtenir un résultat aussi fondamental pour l'achèvement de la Synthèse Moderne ? Si nous prenons en considération la troisième édition de *Genetics and the Origin of Species*, qui est parue en 1951 – et que Gould (1983) considérait, justement, comme marquant le tournant adaptationniste de son auteur –, nous pouvons remarquer que la théorie génétique de l'évolution de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) a joué un rôle fondamental dans l'élaboration des arguments de Dobzhansky (1951) à ce sujet. Comme nous l'avons observé dans la section précédente, la collaboration entre le « théoricien » Wright et le « naturaliste » Dobzhansky – qui avait commencé sa carrière de biologiste en étudiant, pour ne citer qu'un exemple, « la distribution, l'anatomie et les nouvelles espèces de la famille des *Coccinellidae* » (« *the distribution, anatomy, and new species of Coccinellidae* ») (Provine 1986, p 329) – s'est avérée essentielle pour mener à bien la série d'études sur la génétique des populations naturelles que ce dernier avait entamée, à l'aide de ses collaborateurs (Lewontin *et al.* 1981). Comme l'a observé, encore une fois, Provine (1986) – dans la biographie qu'il a consacré à la figure de Sewall Wright –, « la collaboration entre Wright et Dobzhansky » dans le cadre de *Genetics of Natural Populations* (Lewontin *et al.* 1981) constitue, en effet, un véritable exemple paradigmatique des contributions que « les interactions entre la génétique théorique des populations et la recherche de terrain » (« *the interaction between theoretical population genetics and field research* ») que pratiquaient les naturalistes-évolutionnistes qui s'intéressaient à la génétique mendélienne ont pu apporter au développement de la Synthèse Moderne (Provine 1986, p. 327)³⁴⁶.

³⁴⁶ En effet, « les généticiens théoriques des populations et les naturalistes de terrain avaient grand besoin les uns des autres [*Theoretical population geneticists and field naturalists needed each other greatly*']. Fisher, Haldane et Wright étaient tous parfaitement conscients de leur manque de connaissances sur la génétique des populations naturelles. Ils savaient que la discrimination entre schémas théoriques [*theoretical schemes*'] [valides et schémas théoriques invalides] ne pouvait qu'être le résultat de l'analyse génétique des populations naturelles [*the genetic analysis of natural*

Néanmoins, une telle collaboration avait déjà influencé la conception de l'évolution que Dobzhansky (1937) avait exprimée à partir de la toute première édition de *Genetics and the Origin of Species*, au point où l'on pourrait affirmer que « la théorie de l'évolution de Dobzhansky était la théorie de l'évolution de Wright » (« *Dobzhansky's theory of evolution was Wright's theory of evolution* ») (Provine 1986, p. 345). Mais en quoi consistait, par conséquent, la théorie (génétique) de l'évolution qu'avait élaborée Wright (1931a, 1931b, 1932) et de quelle manière Dobzhansky (1937, 1941, 1970) s'en était-il approprié ?

Afin de comprendre la signification des contributions que Sewall Wright (1916, 1917a, 1917b, 1918, 1919, 1920, 1921a, 1921b, 1921c, 1921d, 1921e, 1922, 1923a, 1923b, 1929, 1930, 1931a, 1931b, 1932, 1933, 1937a, 1937b) a apportées à la biologie de l'évolution, et notamment à la génétique théorique des populations, il est nécessaire de les examiner à l'aune de leur problématique, pour ainsi dire, « fondatrice », qui n'était rien d'autre que la nécessité d'augmenter le rendement de la production agricole et zootechnique, par l'amélioration de l'efficacité de la sélection (artificielle ou naturelle) des plantes et des animaux. C'est à une telle question que Wright (1919, 1921a, 1921b, 1921c, 1921d, 1921e) avait, en effet, consacré le plus clair des années 1915-1925, au cours desquels il avait travaillé auprès du Département de l'Agriculture des États-Unis (*United States Department of Agriculture, USDA*), en qualité de généticien expert en « croisements endogames » (« *inbreeding* »)³⁴⁷ – avant d'intégrer le département de zoologie de l'Université de Chicago, en 1926,

populations']. Ceux qui étudiaient les populations naturelles, d'autre part, avaient besoin des modèles des généticiens théoriques des populations afin de s'en servir comme guide pour identifier des programmes de recherche pertinents [*as a guide to meaningful research programs*']. Les modèles quantitatifs identifiaient les paramètres qui étaient pertinents pour l'étude de la microévolution [*the pertinent parameters of microevolution*'], tels que les taux de sélection, les taux de mutation, le degré de dominance, les interactions entre les gènes, la liaison génétique [*linkage*'], les polymorphismes équilibrés [*balanced polymorphisms*'] et les processus aléatoires. Les recherches de terrain que Dobzhansky, Ford et de leurs étudiants ont menées après le début des années 1930 n'étaient pas envisageables si ce n'était dans le contexte des conceptions théoriques de Wright et de Fisher [*inconceivable except in the context of the theoretical visions of Wright and Fisher*'] (Provine 1986, p. 327).

³⁴⁷ Plus précisément, les recherches que Wright (1916, 1917a, 1917b, 1918, 1919, 1920, 1921a, 1921b, 1921c, 1921d, 1921e, 1922, 1923a, 1923b) a effectuées au sein du Département de l'Agriculture portaient, notamment, sur « six axes majeurs : (1) l'hérédité de la pigmentation chez les mammifères [*color inheritance in mammals*'], tout particulièrement chez les cobayes ; (2) la génétique physiologique [*physiological genetics*'], en portant une attention particulière à l'hérédité de la pigmentation, mais également aux anomalies développementales, à la résistance héréditaire à la maladie et aux greffes [*developmental anomalies, hereditary resistance to disease, and transplantation*'] ; (3) le développement de la méthode [d'analyse statistique de la causalité dite 'des coefficients de cheminement'] [*the method of path coefficients*'], ainsi que son application à divers phénomènes ; (4) les effets de l'endogamie et des croisements [entre variétés différentes] [*crossbreeding*] chez les cobayes et chez d'autres animaux ; (5) l'analyse mendélienne des races

et après avoir complété ses études doctorales à l'Université de Harvard, dans le laboratoire de William E. Castle (1916, 1919 ; Castle & Phillips 1914 ; Castle & Wright 1915) – (Provine 1986 ; Crow 1992 ; Allen 2013). La solution (à la fois théorique et expérimentale) à laquelle il était parvenu consistait, justement, à subdiviser une large population d'organismes (comme un troupeau de bétail) en de petits « groupes reproducteurs » (« *breeding groups* »), dans lesquels les individus étaient sujets à des cycles d'accouplement réguliers : dans un premier temps, ils se croisaient avec d'autres membres du même groupe (c'est-à-dire de manière endogame) (« *inbreeding* ») au cours d'un certain nombre de générations, avant de s'hybrider avec des membres d'autres groupes (« *outbreeding* »), dans la phase successive, et ainsi de suite. L'intuition de Wright (1919, 1921a, 1921b, 1921c, 1921d, 1921e) avait donc consisté à comprendre en quoi

l'endogamie au sein des petits groupes [*'inbreeding within the small groups'*] aiderait à fixer les génotypes souhaités [*'help fix desirable genotypes'*], tandis que le croisement entre groupes réunirait de nouvelles combinaisons de gènes [*'outbreeding among groups would bring new combinations together'*], qui fourniraient de la matière première supplémentaire à la sélection [*'additional raw material for selection'*] » (Allen 2013, p. 23).

En conséquence, c'est précisément à partir de cette intuition qu'il avait réussi non seulement à développer de nouvelles considérations sur les mécanismes de fixation de variantes alléliques alternatives dans les populations mendéliennes lorsque ces dernières sont soumises à l'influence de différents facteurs évolutifs, et notamment de la sélection naturelle – en prolongeant, en cela, les analyses de Haldane (1931b, 1932)³⁴⁸ –, mais également à formuler une « conclusion qualitative

pures d'animaux domestiques [*'Mendelian analysis of pure breeds of livestock'*] et (6) la théorie de l'évolution dans les populations naturelles [*'theory of evolution in nature'*] » (Provine 1986, p. 111-112).

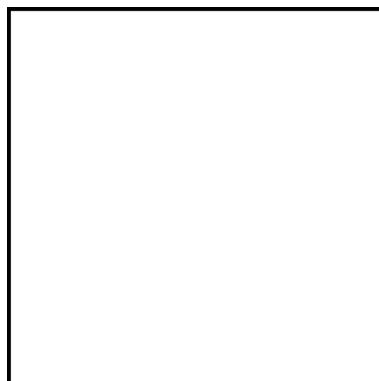
³⁴⁸ Comme l'a expliqué Jean Gayon (1992), le mémoire que J. B. S. Haldane (1931b) a consacré à l'analyse de la dynamique des fréquences alléliques dans des « populations métastables » (« *metastable populations* ») – dans le cadre de sa série d'articles sur la « théorie mathématique de la sélection artificielle et naturelle » (« *A mathematical theory of artificial and natural selection* ») (Haldane 1924-1934) – nous fournit « le premier modèle qui ait décrit l'évolution d'une population soumise à sélection sur deux *loci* en interaction épistatique » (Gayon 1992, p. 354). Plus précisément, ce mémoire porte sur la manière dont l'état d'équilibre qui caractérise la composition génétique d'une population de *Drosophila melanogaster* peut évoluer, sous l'action de la sélection naturelle, lorsque les variantes récessives de deux gènes, *a* et *b*, qui sont individuellement délétères s'avèrent avantageuses (en ceci qu'elles augmentent la valeur de *fitness* des organismes qui les possèdent) lorsqu'elles apparaissent de manière conjointe. En conséquence, afin de modéliser la variation des fréquences alléliques en question, Haldane (1931b) considérait les quatre génotypes possibles, auxquels il attribuait différents coefficients de sélection, en tant que mesures de leurs « probabilités relatives d'engendrer une progéniture » (« *relative chances of producing offspring* ») : $[AB] : 1$; $[aB] : 1-k_1$; $[Ab] : 1-k_2$; $[ab] : 1+K$, où k_1 et k_2

générale » (« *general qualitative conclusion* ») au sujet de l'évolution des populations naturelles et domestiques. (Wright 1951 ; Wright & Provine 1986, p. 596). Il s'agissait, plus précisément, de la conclusion d'après laquelle toute forme de « processus évolutifs dépend d'un état d'équilibre, toujours fluctuant, mais jamais effacé, entre des facteurs de persistance et de changement » (« *evolutionary process depends on a continually shifting but never obliterated state of balance between factors of persistence and change* ») (Wright 1951 ; Wright & Provine 1986, p. 596) et que Wright (1951) avait pu tirer du constat que « la condition la plus favorable » (« *the most favourable*

sont de petits coefficients positifs, alors que K « est petit et, s'il est négatif, sa valeur absolue [*'absolute value'*] est inférieure à celle de k_1 ou à celle de k_2 » (Haldane 1931b, p. 137). C'est ainsi que, à partir de tels coefficients de sélection et des « rapports géniques » (« *genic ratios* ») entre les quantités d'allèles dominants et celles d'allèles récessifs pour les deux gènes en question, à savoir u pour le rapport A/a et v pour le rapport B/b , Haldane (1931b) pouvait écrire un système de deux équations différentielles permettant de déterminer l'évolution, au fil des générations successives, de la fréquence de l'allèle récessif a , c'est-à-dire $x = \frac{1}{(1+u)}$, ainsi que celle de l'allèle récessif b , c'est-à-dire $y = \frac{1}{(1+v)}$:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x^2(1-x)[(K+k_1+k_2)y^2 - k_1] \\ \frac{dy}{dx} = y^2(1-y)[(K+k_1+k_2)x^2 - k_2] \end{cases}$$

(Haldane 1931b, p. 137). Ce système lui permettait, plus précisément, de représenter les possibles variations de la composition génétique de la population en question, c'est-à-dire les possibles variations des fréquences relatives des allèles a (x) et b (y), sous la forme de trajectoires « sur un champ continu de fréquences géniques » (Gayon 1992, p. 355), comme en témoigne le diagramme à la figure (12), tracé par Haldane (1931b) lui-même, assisté de C. H. Waddington :



(Haldane 1931b, p. 140). Comme l'a observé, encore une fois, Jean Gayon (1992), ce diagramme nous permet d'en conclure que le système (c'est-à-dire la structure génétique de la population) en question « évolue de manière déterministe vers deux équilibres stables possibles. L'un des équilibres correspond à la fixation des deux allèles récessifs a et b (partie supérieure droite du diagramme), l'autre à la fixation des allèles dominants A et B (en bas à gauche). L'évolution effective du système dépend de l'état initial. On remarque qu'il y a aussi un équilibre instable. Bien que Haldane n'effectue pas le rapprochement, on reconnaît dans ce système un exemple de ce qu'en physique on appelle couramment aujourd'hui un système dissipatif » (Gayon 1992, p. 355).

condition ») afin qu'un tel état puisse se produire était l'existence de populations « dans lesquelles il y [avait] une structure finement subdivisée où l'isolement et la communication mutuelle entre les différents groupes d'organismes [restaient] en équilibre » (« *where there is a finely subdivided structure in which isolation and cross-communication keep in proper balance* ») (Wright 1951 ; Wright & Provine 1986, p. 596). C'est ainsi qu'il était parvenu à envisager les populations naturelles non pas comme de vastes groupes « panmictiques » (« *panmictic* ») – c'est-à-dire des populations dont le nombre d'effectifs est si élevé que chacun des individus qui leur appartiennent a, du moins théoriquement, la même probabilité de se reproduire avec n'importe quel autre membre de la même population – (Fisher 1930), mais comme des groupes qui seraient structurés en un certain nombre de sous-populations locales, c'est-à-dire en un certain nombre de « dèmes » (« *demes* ») (Wright 1960), qui occuperaient chacune une micro-niche particulière au sein de la zone géographique dans laquelle vit l'ensemble de la population dont ils relèvent. Une telle conclusion est d'autant plus fondamentale, d'un point de vue théorique, qu'elle constitue le noyau conceptuel de la théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle que Wright (1931a, 1931b, 1932) a pu élaborer à partir des recherches qu'il avait menées au sein du Département de l'Agriculture, ainsi que sur la base de deux articles qu'il avait consacrés, respectivement, à l'« évolution dans les populations mendéliennes » (« *evolution in Mendelian populations* ») et aux « rôles de la mutation, de l'endogamie, des croisements entre races [ou variétés] et de la sélection dans l'évolution » (« *roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution* »), c'est-à-dire une « théorie de l'équilibre fluctuant » (« *shifting balance theory* ») – pour emprunter la traduction de Jean Gayon (1992, p. 353) – des différents facteurs évolutifs, qui repose, à son tour, sur le concept de « paysage adaptatif », ou de « surface de *fitness* » (« *fitness surface* ») (Provine 1986, p. 308). Mais en quoi consiste, plus précisément, cette théorie ?

D'après la présentation qu'en faisait Wright (1951) lui-même, nous pouvons résumer une telle théorie, du moins dans sa version la plus informelle, en trois points essentiels, qui sont étroitement liés l'un à l'autre, dont le premier consiste, précisément, dans la manière dont Wright (1930, 1931a, 1931b, 1932, 1951, 1978) envisageait la structure des populations, ainsi que les effets qu'un tel paramètre finit par exercer sur les processus évolutifs dans différents cas de figure. Ce dernier s'opposait, en effet, à la conception de l'évolution (et notamment de l'évolution adaptative) que prônait, par exemple, R. A. Fisher (1930), c'est-à-dire à une conception de l'évolution comme étant le produit d'un processus de « sélection de masse » (« *mass selection* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 5). D'après une telle vision, l'évolution résulterait, en effet, de l'action de pressions de sélection, aussi faibles soient-elles, sur le vaste réservoir de petites variations individuelles, de nature quantitative, que constitue une vaste population qui serait « essentiellement homogène, sauf

dans le cas où la présence d'environnements locaux différents [pourrait] entraîner une différenciation sélective » (« *essentially homogeneous except in so far as different local environments may bring about selective differentiation* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 5). Tout en ne négligeant pas l'importance de la sélection de masse³⁴⁹, Wright (1930, 1931a, 1931b, 1978) doutait du fait qu'on puisse la considérer comme étant le principal facteur évolutif. Plus précisément, d'une part, il considérait que le type de sélection qu'envisageait Fisher (1930) présupposait l'existence d'« un flux inépuisable de nouvelles mutations favorables » (« *an inexhaustible flow of new favorable mutations* »), qui maintienne un certain niveau de variabilité au sein de la population en question, et donc, également, l'existence d'un nombre indéfiniment grand d'allèles pour chaque *locus* chromosomique, si bien que n'importe lequel d'entre eux pourrait devenir, à tout moment, « une source potentielle de gènes qui n'auraient pas pu faire leur apparition auparavant » (« *a potential source of genes which could not have appeared previously* ») (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 85). D'autre part, il était persuadé que, si l'on parlait du présupposé que les « espèces [seraient] typiquement hétéroalléliques [*typically heterallelic*] [ou hétérozygotes] pour des dizaines de milliers de *loci*, dans lesquels les allèles dominants ne diffèrent que légèrement [des autres allèles] dans leurs effets [*the leading alleles differ only slightly in effect*] » et qu'une telle situation ne serait rien d'autre qu'« un état de quasi-équilibre qui fluctuerait sans cesse » (« *a continually shifting state of near-equilibrium* ») sous l'action des « pressions opposées qu'exercent des mutations récurrentes, la diffusion des gènes et une sélection faible » (« *the opposing pressures of recurrent mutation, diffusion and weak selection* »), il fallait en conclure que la sélection de masse était « susceptible d'entraîner des effets secondaires délétères en raison de l'interférence de la sélection opérant dans un certain sens avec la sélection opérant dans les autres sens » (« *this process is likely to lead to deleterious side effects because of the interference of selection in any one respect with selection of the others* ») (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 8-9). C'est pourquoi Wright (1930, 1978) estimait que les conditions les plus favorables à l'émergence de différences adaptatives au sein d'une population donnée se produiraient chaque fois que cette dernière se subdiviserait en « souches locales,

³⁴⁹ « Lorsque j'étais assistant du professeur Castle, j'ai pu constater, de première main, l'efficacité de la sélection de masse pour modifier de façon permanente un caractère qui n'est soumis qu'à la variabilité quantitative [*the efficacy of mass selection in changing permanently a character subject merely to quantitative variability*] [c'est-à-dire qui varie par petites différences individuelles et non pas par mutations de grande ampleur]. En raison de cela, ainsi que de mon aversion pour les miracles dans la science, j'ai commencé ma carrière en acceptant sans réserve la thèse de Darwin d'après laquelle l'évolution dépend principalement de la variabilité quantitative, plutôt que de l'émergence de mutations favorables et de grande ampleur [*I started with full acceptance of Darwin's contention that evolution depends mainly on quantitative variability rather than on favorable major mutations*] » (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 8).

imparfaitement isolées » (« *imperfectly isolated local strains* ») (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 86), car cela favoriserait « une fluctuation kaléidoscopique et continue des combinaisons de gènes prévalentes » (« *a continuous kaleidescopic shifting of the prevailing gene combinations* ») (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 85), due aux différences génétiques qui émergeraient entre les diverses souches. Une telle fluctuation, précisait Wright (1930), n'est pas nécessairement elle-même adaptative, mais « rend possible l'apparition occasionnelle de nouvelles combinaisons de types, de nature adaptative, qui ne seraient jamais réalisées par un processus de sélection directe [*the occasional appearance of new adaptive combinations of types which would never be reached by a direct selection process*'] » (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 85)³⁵⁰.

Le deuxième point consiste, en revanche, en ceci que Wright (1978) ne se limitait pas, tout simplement, à considérer les populations comme étant des réseaux de dèmes locaux, mais il étendait une telle perspective aux organismes eux-mêmes. Plus précisément, il concevait les organismes comme consistant en des « réseaux de systèmes d'interaction » (« *networks of interaction systems* ») – c'est-à-dire en des réseaux de combinaisons de gènes qui sont disposés dans plusieurs *loci* et qui sont pléiotropes (« *pleiotropic* »)], au sens où ils peuvent agir sur plusieurs caractères phénotypiques – plutôt que comme étant de « simples mosaïques de 'caractères unitaires' qui sont chacun déterminés par un seul et même gène » (« *mere mosaics of 'unit characters', each determined by a single gene* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 9). Si l'on envisage les organismes de cette manière, il faut donc en conclure que ce ne sont pas les gènes, en tant que tels, qui constituent le substrat de la sélection naturelle, mais « des complexes de gènes harmonieux et coadaptés » (« *harmonious, coadapted gene complexes* ») (Crow 1992, p. 182), ce qui pose un problème au regard du modèle de la sélection de masse, puisque cette dernière « ne peut agir [en tant que facteur évolutif] qu'en fonction des effets nets de substitutions d'allèles isolés dans le cadre de la reproduction biparentale » (« *can operate only according to the net effects of substitutions under biparental reproduction* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 9). En d'autres termes, la manière dont Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) se représentait les organismes implique que la sélection naturelle agirait, toujours en tant que facteur évolutif, sur « tout le champ des possibles combinaisons de gènes » (« *the entire*

³⁵⁰ « Il en découlerait des changements profonds du système des coefficients de sélection [*thorough-going changes in the system of selection coefficients*'], des changements dans les matrices stochastiques mêmes des différents gènes [*changes in the probability arrays themselves of the various genes*] et, à long terme, un progrès adaptatif essentiellement irréversible de l'espèce [*an essentially irreversible adaptive advance of the species*']. Il m'a semblé que les conditions pour que se réalisent des changements évolutifs seraient plus favorables ici que dans le cas des populations indéfiniment larges du schéma du Dr. Fisher [*in the indefinitely large population of Dr. Fisher's scheme*'] » (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 85).

field of possible gene combinations ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 162) dont se compose le *pool* génétique d'une population donnée, ou du moins sur le champ des combinaisons les plus probables d'un point de vue purement statistique³⁵¹. Il en découle que, afin de visualiser l'action de la sélection naturelle sur les individus qui constituent une certaine population – telle que la concevait Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) lui-même – il serait nécessaire de prendre en considération un champ qui comporte autant de dimensions que le nombre des combinaisons géniques auxquelles on s'intéresse, ainsi que d'y ajouter une dimension supplémentaire, dont la fonction consisterait, en revanche, à représenter les différentes valeurs de *fitness*, c'est-à-dire les différentes « valeurs adaptatives » (« *adaptive values* »), que l'on pourrait associer, en moyenne, aux divers génotypes dans telle ou telle condition environnementale (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 162). En polémique – encore une fois – avec Fisher (1930), Wright (1930) considérait, en effet, que la valeur de *fitness* d'un individu donné ne saurait se réduire « à la somme des contributions [causales que] tous les gènes » (« *the sums of the contributions of all genes* ») dont se compose son génotype apportent, de manière isolée, à sa valeur adaptative, considérée comme étant elle-même un caractère phénotypique (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 84). Il estimait, au contraire, qu'il valait mieux supposer qu'une telle valeur soit toujours le résultat d'« importants effets épistatiques » (« *important epistatic effects* »), puisque « des gènes qui sont avantageux dans une certaine combinaison sont, par exemple, extrêmement susceptibles d'être délétères dans une autre combinaison » (« *genes favorable in one combination, are, for example, extremely likely to be unfavorable in another* ») (Wright 1930 ; Wright & Provine 1986, p. 84), si bien que l'on pourrait établir une relation étroite entre la valeur de *fitness*, ou valeur adaptative, d'un individu donné et la

³⁵¹ Considérons une population dont la structure génétique consiste en 1000 *loci*, chacun desquels peut être occupé par 10 allèles alternatifs, si bien que le champ de combinaisons géniques qui y est associé comporte 10^{1000} dimensions. « Supposons que chaque gène typique [*'type gene'*] soit présent chez 99% des effectifs [*'is manifested in 99 percent of the individuals'*] [de la population en question] et que la majeure partie du 1% restant possède le plus favorable parmi tous les alléomorphes [de ce même gène typique], ce qui signifie, généralement, qu'elle possède un allèle qui n'a qu'un faible effet différentiel [*'one with only a slight differential effect'*] [par rapport au gène typique]. L'individu moyen manifestera les effets de 1% des [1000 *loci* qui sont occupés par un allèle qui est légèrement plus favorable que le gène typique], c'est-à-dire les effets de 10 déviations du type, [*'The average individual will show the effects of 1 percent of the 1000, or 10 deviations from the type'*] et, comme cette population présente une déviation standard qui est égale à $\sqrt{10}$, seule une petite proportion de ses effectifs montrera les effets de plus de 20 déviations du type, alors que les déviations possibles sont au nombre de 1000 [*'since this average has a standard deviation of $\sqrt{10}$ only a small proportion will exhibit more than 20 deviations from type where 1000 are possible'*]. Cette population est, par conséquent, confinée à une portion infinitésimale du champ de toutes les possibles combinaisons géniques [*'The population is thus confined to an infinitesimal portion of the field of possible gene combinations'*] » (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 161).

valeur de *fitness* moyenne du génotype qui le caractérise, à condition que l'on considère ce dernier comme étant une combinaison harmonieuse de gènes coadaptés. C'est ainsi que, du point de vue de Wright (1932), lorsqu'on étudie un système mendélien qui se compose de cinq *loci* qui sont occupés par des gènes ayant chacun deux variantes alléliques – à savoir un allèle dominant (*A, B, C, D, E*) et un allèle récessif (*a, b, c, d, e*) – le champ en question comportera un nombre de dimensions qui sera égal à $2^5 + 1 = 33$, alors que, si l'on s'intéresse à un modèle « deux allèles pour deux *loci* », les dimensions à considérer seront $2^2 + 1 = 5$ (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 162). C'est pourquoi, comme nous l'avons anticipé plus haut, Wright (1932) proposait de représenter, de manière purement approximative, le champ de toutes les combinaisons de gènes que l'on peut observer dans telle ou telle population sous la forme d'un paysage adaptatif, c'est-à-dire d'une topographie comme celle que nous reproduisons à la figure (13). Dans un tel diagramme, les diverses courbes de niveau correspondent à différents niveaux de *fitness*, ou de valeur adaptative, moyenne (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163), si bien que les différentes familles de combinaisons de gènes qui sont reliées les unes aux autres peuvent se retrouver « groupées » (« *clustered* ») autour de « pics adaptatifs », qui correspondent donc à des valeurs de *fitness* plus élevées que celles que l'on peut attribuer aux familles environnantes et qui sont séparés par des « points-selles » (« *saddles* ») ou par des « vallées » (« *valleys* »), c'est-à-dire

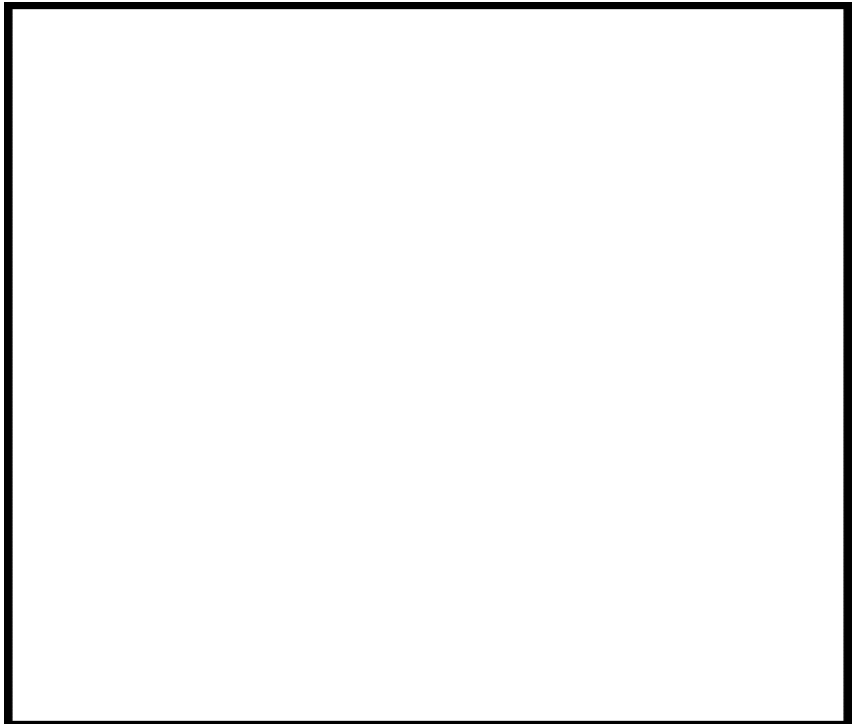


Figure 13 : « Représentation diagrammatique du champ des combinaisons génétiques en deux dimensions, plutôt qu'en plusieurs milliers de dimensions. Les lignes pointillées représentent des courbes de niveau [qui mesurent le degré] d'adaptativité » (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163)

par des régions du champ qui sont associées à des valeurs de *fitness* inférieures à celles des pics, voire minimales (Wright 1932 ; Dobzhansky 1951). Cela dit, en quoi un tel diagramme nous permettrait-il de décrire, ne serait-ce que de manière purement heuristique, l'évolution de la composition génétique de la population en question ?

Afin de répondre à une telle question, il est nécessaire de revenir, encore une fois, sur les critiques que Wright (1930, 1932) a adressées à R. A. Fisher (1930) et à sa « théorie génétique de la sélection naturelle » (« *genetical theory of natural selection* »). Plus précisément, la critique de la conception

fisherienne de la sélection naturelle en tant que « sélection de masse » que menait Wright (1930) s’inscrivait dans une analyse de ce qu’on appelle communément le « théorème fondamental de la sélection naturelle de Fisher » (« *Fisher’s fundamental theorem of natural selection* ») (Fisher 1930 ; Wright 1930). Il s’agit, en effet, d’un énoncé très général qui concerne le fonctionnement de la sélection naturelle, en tant que facteur évolutif, et qui affirme que « le taux d’accroissement de la valeur [moyenne] de *fitness* d’une espèce [– ou, plus précisément, d’une population –] quelconque est égal à la variance génétique en *fitness* [de cette même espèce] » (« *the rate of increase of fitness of any species is equal to the genetic variance in fitness* ») (Fisher 1930, p. 46 ; Gayon 1992 ; Plutynski 2006 ; Okasha 2008)³⁵². Par « variance génétique en *fitness* », Fisher (1930) entendait,

³⁵² Comme l’explique, entre autres, Samir Okasha (2008), le théorème de Fisher (1930) a été interprété de deux manières différentes. D’après ce qu’on appelle l’« interprétation traditionnelle » (« *traditional interpretation* ») (Okasha 2008) de son théorème, Fisher (1930) aurait entendu affirmer que le taux de variation total de la valeur moyenne de *fitness* d’une population donnée serait toujours égal à la variance génétique (additive) en *fitness*, c’est-à-dire à la portion de la variance de la valeur de *fitness* de tel ou tel organisme, en tant que caractère phénotypique, que l’on peut expliquer par l’action causale des gènes, considérés individuellement (et donc indépendamment de toute forme d’interaction entre gènes qui sont situés dans des *loci* différents, telle la dominance ou l’épistasie). Une telle interprétation implique, néanmoins, que le théorème de Fisher (1930) serait tout simplement faux. En effet, puisque la variance d’un caractère phénotypique est, par définition, une quantité positive, cela signifie que, si l’on accepte l’interprétation traditionnelle du théorème de Fisher (1930), force en est d’en conclure que la valeur moyenne de *fitness* d’une population donnée serait, globalement, toujours croissante, ce qui n’est, pourtant, pas nécessairement le cas (Edwards 1994). C’est précisément pour une telle raison que le théorème fondamental de Fisher (1930) a longtemps été considéré soit comme étant erroné, soit comme n’étant vrai que dans un nombre très limité de cas (Moran 1962, 1964 ; Crow & Kimura 1970), alors que Fisher (1930) lui-même avait précisé qu’il s’agissait d’un résultat exact, dont la validité était aussi générale que celle du second principe de la thermodynamique (Okasha 2008, p. 329). Une telle situation n’a changé que lorsque George Price (1972) a réussi à reformuler le théorème de Fisher (1930) d’une manière qui finirait, au cours des années 1990, par s’avérer propice à l’élaboration d’une interprétation alternative, c’est-à-dire de ce qu’on appelle généralement l’« interprétation moderne » (« *modern interpretation* ») (Okasha 2008) de ce même théorème (Ewens 1989 ; Frank & Slatkin 1992 ; Edwards 1994 ; Frank 1995, 1997 ; Lessard 1997 ; Grafen 2003). Selon cette autre interprétation, le théorème de Fisher (1930) affirmerait que seule l’une des composantes du taux de variation de la valeur moyenne de *fitness* d’une population donnée serait égale à la variance génétique (additive) en *fitness*, et donc toujours croissante. Il s’agit, plus précisément, de la composante de ce même taux de variation qui serait « due à la sélection naturelle dans un environnement constant » (« *due to natural selection in a constant environment* ») (Okasha 2008, pp. 329-330). Cela signifie que, d’après la formalisation du théorème de Fisher (1930) « à temps continu » (« *for continuous time* ») qu’a proposée Okasha (2008) lui-même,

$$\frac{\partial \bar{w}_{NS}}{\partial t} = Var_{add}(g),$$

notamment, « la variance génétique additive, c'est-à-dire la variance attribuable aux effets additifs des gènes, par opposition à la variance d'interaction allélique (dominance), et à la variation d'interaction génique (épistasie) » (Gayon 1992, p. 345) à laquelle Wright (1930, 1931a, 1931b, 1932, 1978) portait, au contraire, une attention toute particulière. Mais en quoi consiste, donc, la signification biologique de cet énoncé, du moins tel que l'interprétait Wright (1930, 1932, 1978) lui-même ? D'après Wright (1930, 1932, 1978), la signification du théorème fondamental de Fisher (1930) consistait à décrire la manière dont la sélection naturelle qui s'exerce sur les membres d'une large population panmictique les conduit à atteindre des valeurs adaptatives qui sont, en moyenne, de plus en plus élevées, mais à une vitesse qui tend toujours à décroître – « en parfait accord avec la diminution constante de la variance génétique additive » (« *in exact accord with the steadily decreasing additive genetic variance* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 10) qu'entraîne la fixation des allèles les plus avantageux, au détriment des autres – et pourvu que « les conditions [environnementales] restent inchangées » (« *as long as conditions remain unchanged* ») (Wright 1978 ; Wright & Provine 1986, p. 10). Dans le cadre d'une topologie adaptative comme celle que nous pouvons observer à la figure (13), une telle interprétation du théorème de Fisher (1930) se traduit, ainsi, par la configuration suivante. Une population donnée est représentée par un nuage de points que l'on peut situer dans un champ de combinaisons géniques qui n'est rien d'autre qu'une visualisation de la structure de son *pool* génétique, relativement à des conditions environnementales données, et où il n'y a qu'un seul et unique « pic adaptatif », qui correspond à une sorte de grappe « de génotypes de composition voisine, agglutinés autour d'une combinaison optimale » (Gayon 1992, p. 357-358), c'est-à-dire à une combinaison à laquelle on peut attribuer la valeur adaptative la plus élevée que la population en question puisse attendre dans les conditions données. C'est ainsi que, en conformité avec le théorème de Fisher (1930) tel que l'interprétait Wright (1930, 1932, 1978), l'action de la sélection naturelle ferait en sorte que la population « remonte », pour ainsi dire, la pente du seul pic adaptatif qui lui soit accessible, en suivant ainsi « le gradient le plus raide qui pointe vers le sommet » (« *the steepest gradient toward the peak* »), jusqu'à ce qu'elle n'y parvienne, « après quoi elle resterait inchangée, sauf dans le rare cas où émergeraient de nouvelles mutations favorables » (« *having reached which it would remain unchanged except for the rare occurrence of*

où $\frac{\partial \bar{W}_{NS}}{\partial t}$ représente, précisément, le taux de variation partiel de la valeur moyenne de *fitness* que l'on peut attribuer à l'action de la sélection naturelle dans un environnement constant, alors que $Var_{add}(g)$ représente la variance génétique (additive) en *fitness* (Okasha 2008, p. 330). En conséquence, c'est à partir de la distinction, à la fois formelle et conceptuelle, entre différentes composantes du taux de variation de la *fitness* moyenne ($d\bar{W}$) d'une population donnée que l'interprétation moderne du théorème de Fisher (1930) a permis d'étayer la revendication de l'exactitude et de l'universalité de ce dernier.

new favorable mutations ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163). Wright (1931b, 1932) estimait, néanmoins, qu'une telle configuration était largement improbable, puisque, à son avis, il aurait fallu s'attendre à ce que la représentation de la structure génétique d'une population donnée, relativement aux différentes valeurs moyennes de *fitness* de tous les génotypes possibles, prenne la forme d'un « champ accidenté » (« *rugged field* ») (Wright 1932), en raison des « relations épistatiques »

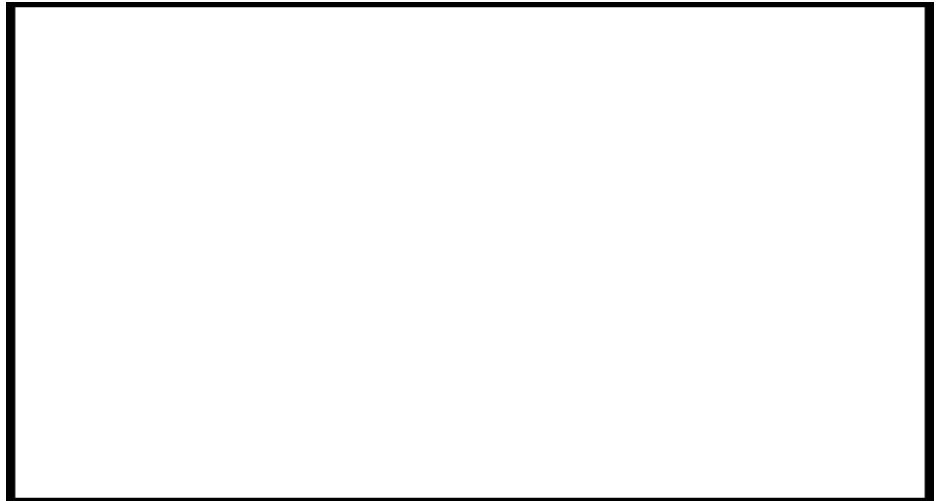


Figure 14 : Représentation de trois pics adaptatifs, dont deux sont suboptimaux, esquissée par Wright lui-même dans une lettre à Fisher (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 272)

(« *epistatic relations* ») entre gènes situés dans des *loci* différents, qui font en sorte que tel ou tel allèle puisse s'avérer, tour à tour, bénéfique ou délétère en fonction de la combinaison génique dans laquelle il est, pour ainsi dire, « imbriqué »³⁵³. Nous pouvons aisément observer que, dans cet autre cas de figure, la sélection de masse que décrit le théorème de Fisher (1930) n'aurait aucun donc mal à pousser la population en question au sommet du pic le plus proche, même s'« il se peut qu'il y ait d'innombrables pics alternatifs, qui sont plus élevés [que celui-ci], mais qui sont séparés par des 'vallées' » (« *there may be innumerable other peaks which are higher but which are separated by 'valleys'* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163), comme le montre le diagramme à la figure (14), esquissé par Wright (1931b) lui-même dans sa lettre à Fisher. Une telle éventualité pose, en conséquence, une question cruciale, que Wright (1932) lui-même appelait « le problème de l'évolution » (« *the problem of evolution* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163) et qui constitue le dernier des trois points essentiels auxquels se résume sa théorie de l'équilibre fluctuant, du moins dans sa version la plus informelle : existe-il « un mécanisme par le biais duquel

³⁵³ Plus précisément, comme l'écrivait Wright (1931b) lui-même dans une lettre adressée à Fisher et publiée par Provine (1986), si l'on considérait une topographie adaptative quelconque, il faudrait plutôt s'attendre à ce que « le champ [en question soit] parsemé de bosses [*very humpy*]', par rapport à [la dimension qui mesure les différents degrés de *fitness* moyenne], en raison des relations épistatiques [*because of epistatic relations*]', puisque des groupes de mutations qui étaient individuellement délétères produisent un résultat harmonieux en combinaison les uns avec les autres [*groups of mutation which were deleterious individually producing a harmonious result in combination*'] » (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 272 ; partiellement cité par Gayon 1992, p. 355).

[une espèce donnée] peut se frayer, à toute occasion, un chemin qui mène d'un pic inférieur à un pic supérieur » (« *mechanism by which the species may continually find its way from lower to higher peaks* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 163), quand bien même les deux pics en question seraient séparés par une vallée adaptative ?

La réponse que Wright (1931b, 1932) a lui-même apportée à cette question consiste à avancer l'hypothèse qu'un tel mécanisme ne serait rien d'autre qu'« une sorte de mécanisme d'essai et d'erreur à grande échelle, par lequel l'espèce en question peut explorer la région [du champ de toutes les possibles combinaisons géniques] qui entoure la petite portion [de ce même champ] qu'elle occupe

déjà » (« *some trial and error mechanism on a grand scale by which the species may explore the region surrounding the small portion of the field which it occupies* »), en échappant, par ce même biais, au « contrôle étroit »

(« *strict control* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 164)

qu'une « pression sélective constante » (« *steady pressure of selection* ») (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273), telle que celle que présuppose le théorème

fondamental de Fisher (1930), exercerait sur ses trajectoires évolutives. Plus précisément, Wright (1931b) identifiait quatre facteurs principaux dont la fonction consisterait à contrecarrer l'action de la sélection naturelle et à permettre, ainsi, à une population donnée de traverser un point-selle, voire une



Figure 15 : Exemple de paysage adaptatif quadridimensionnel qui représente les interactions entre deux *loci* diploïdes. L'axe horizontal d'en bas mesure la fréquence relative des génotypes qui possèdent deux allèles *SS* au premier *locus* et deux allèles *TT* au second, par rapport au génotypes qui possèdent deux allèles *BB* à l'un et deux allèles *TT* à l'autre ; l'axe vertical de gauche mesure la fréquence relative des génotypes qui possèdent deux allèles *SS* au premier *locus* et deux allèles *SS* au second, par rapport aux génotypes qui possèdent deux allèles *SS* à l'un et deux allèles *TT* à l'autre, etc. Les lignes des niveaux représentent les valeurs sélectives des différents génotypes. L'on peut observer que ces lignes constituent une sorte de « crête montagnaise » (« *ridge* ») qui est orientée selon les axes *AB* et *CD* (Lewontin & White 1960, p. 124)

vallée, pour passer d'un pic sous-optimal à un pic optimal. Le premier facteur est la présence d'« un environnement qui change de manière irrégulière » (« *irregularly changing environment* ») (Wright

1931b ; Provine 1986, p. 273), ce qui se traduit par un déplacement des bosses dont est parsemé le paysage adaptatif de la population en question, c'est-à-dire par un déplacement indirect de cette dernière. Le second est l'émergence de « nouvelles mutations dans des séries [de gènes] multiples et indéfiniment étendues » (« *novel mutations in indefinitely extended multiple series* ») (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273), qui produisent de nouveaux génotypes, en étendant ainsi la dimensionnalité du paysage adaptatif en question et en créant de nouvelles combinaisons optimales. Le troisième est l'existence de mécanismes qui limitent la taille de telle ou telle population, si bien que « la variation aléatoire des fréquences relatives des gènes » (« *random variation in gene frequency* »), comme celle qui est causée par la dérive génétique, puisse produire des changements importants – « mais non pas d'une importance déterminante, comme c'est le cas en situation d'endogamie stricte » (« *but not overwhelmingly important as under close inbreeding* ») – dans sa structure génétique (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273). L'on peut, en effet, émettre l'hypothèse que de tels changements pourraient permettre à une population que la pression exercée par la sélection de masse aurait amenée, par exemple, au sommet du pic *B* dans la figure (14) d'osciller autour de cette position et, éventuellement, de s'en éloigner à tel point qu'une nouvelle pression de sélection finirait par la conduire au sommet du pic *A* ou du pic *C*. « Comme la population en question pourrait s'évader du pic *A* plus aisément qu'elle ne pourrait le faire du pic *C* », en concluait Wright (1931b), « la tendance générale serait à une augmentation de l'adaptation bien qu'un tel processus soit très lent » (« *the general tendency would be toward increasing adaptation even though the process would be very slow* ») (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273). C'est ainsi que le quatrième et dernier facteur, étroitement lié au précédent, consiste, justement, dans « la subdivision d'une espèce indéfiniment large en plusieurs groupes de petite taille, qui ne sont pas complètement isolés les uns des autres » (« *subdivision of an indefinitely large species into many small, not quite completely isolated groups* ») (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273). Comme nous l'avons vu en parlant du troisième facteur, il serait, en effet, possible de supposer que, dans le cas d'une population qui se trouverait au sommet du pic *B* de la figure (14), de tels groupes oscilleraient aléatoirement autour de cette position, si bien qu'une partie d'entre eux finirait par « tomber », pour ainsi dire, dans le « domaine d'attraction » (« *domain of attraction* ») (Crow 2007, p. 94) du pic *A*, alors que l'autre partie finirait par tomber dans celui du pic *C* et donc par se laisser transporter – par l'action de la sélection naturelle – au sommet de celui-ci³⁵⁴.

³⁵⁴ Comme l'a souligné James F. Crow (2007), d'après la théorie de Wright (1931a, 1931b, 1932), alors que l'oscillation aléatoire des groupes locaux en lesquels peut se subdiviser une population plus large serait généralement l'effet de facteurs non-adaptatifs, tels que la dérive génétique aléatoire, « l'escalade » d'un pic serait toujours le résultat de l'action de la sélection naturelle. Cette autre phase des processus évolutifs, tels que les envisageait Wright (1931a, 1931b, 1932), constitue ainsi le versant plus proprement « sélectionniste » de la théorie de l'équilibre fluctuant.

Comme cette autre partie de la population serait « mieux adaptée » (« *better adapted* ») que celle qui serait restée sur le pic *B* et de celle qui se serait déplacée vers le pic *A*, elle « tendrait à augmenter de nombre d'effectifs », peu importe sa taille initiale, « et à devenir la principale source de migrations vers les autres groupes » (« *would tend to increase in population and become the major source of migrants to other groups* »), si bien que, sur la longue durée, elle finirait par entraîner la population entière vers le pic *C* (Wright 1931b ; Provine 1986, p. 273)³⁵⁵. Nous pouvons donc en conclure que le troisième des points essentiels auxquels se résume la théorie de l'équilibre fluctuant de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) – c'est-à-dire la question de l'existence d'un mécanisme évolutif qui permette à une population donnée d'explorer son propre paysage adaptatif, à la recherche de pics toujours plus hauts – nous donne les moyens de montrer en quoi consiste le lien qui unit les deux autres points. Plus précisément, elle nous permet de montrer qu'un tel lien consiste en ceci que les interactions épistatiques entre les différents gènes qui composent les génotypes possibles (point 2) font en sorte que le paysage adaptatif d'une population donnée, ou d'un certain groupe de populations, se caractérise par une conformation accidentée, ce qui implique, à son tour, que « la subdivision d'une espèce en races locales » (« *subdivision of a species into local races* ») (point 1) « offre le mécanisme d'essai et d'erreur le plus efficace [pour explorer] le champ des combinaisons de gènes » (« *provides*

³⁵⁵ Comme le précise Wright (1932) lui-même dans son article de 1932, lorsque l'on prend en considération « le cas d'une espèce large qui est subdivisée en plusieurs races locales, de petites dimensions, dont chacune se reproduit majoritairement de manière endogame, mais aussi, occasionnellement, par hybridation avec d'autres races » (« *the case of a large species which is subdivided into many small local races, each breeding largely within itself but occasionally crossbreeding* »), l'on peut imaginer que « le champ de combinaisons géniques qu'occupe chacune de ces races locales [fluctuera] de manière continue et non-adaptative (à moins qu'il n'y ait des différences locales dans les conditions de sélection) » (« *the field of gene combinations occupied by each of these local races shifts continually in a nonadaptive fashion (except in so far as there are local differences in the conditions of selection)* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 168), et cela à une vitesse qui est indirectement proportionnelle à la taille de la race en question et directement proportionnelle à sa propension à l'hybridation. De tels changements au niveau des champs de combinaisons géniques locaux qui sont propres aux différentes races finiront, en conséquence, par se traduire, au niveau du champ de combinaisons géniques qui caractérise l'espèce tout entière, par des oscillations relativement rapides autour du « pic de contrôle » (« *controlling peak* ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 168), c'est-à-dire autour du pic adaptatif vers lequel tend l'espèce en question, lorsqu'elle subit une pression de sélection. En conséquence, « il y a de bonnes chances qu'au moins [l'une parmi les races dont se compose l'espèce en question] tombe sous l'influence d'un autre pic [*'come under the influence of another peak'*]. S'il s'agit d'un pic plus élevé [que le pic de contrôle], cette race grandira en nombre et, par hybridation avec les autres [*'by crossbreeding with the others'*], entrainera l'espèce entière vers cette nouvelle position [*'pull the whole species toward the new position'*]. La capacité moyenne d'adaptation de l'espèce [*'the average adaptiveness of the species'*] [augmentera], par conséquent, sous l'action de la sélection entre groupes [*'under intergroup selection'*], un processus énormément plus efficace que la sélection au sein d'un seul et même groupe [*'under intragroup selection'*] » (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 168).

the most effective mechanism for trial and error in the field of gene combinations ») (Wright 1932 ; Wright & Provine 1986, p. 168).

Comme l'ont observé Provine (1986) et Gayon (1992), les paysages adaptatifs tels que celui que nous venons de décrire constituent, néanmoins, des objets mathématiques dont la nature demeure ambiguë. Pour s'en rendre compte, il suffit de comparer – comme l'a fait, justement, Provine (1986) – les paysages adaptatifs de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) au paysage, ou surface, que l'on peut construire à partir de n'importe quelle fonction reliant deux (voire plusieurs) « variables indépendantes » (« *independent variables* ») qui représentent des grandeurs physiques continues (Provine 1986, p. 308). Si nous considérons, par exemple, la « loi des gaz de Boyle » (« *Boyle's law of gases* »), $T = kPV$, où T , P et V représentent, respectivement, la « température absolue » (« *absolute temperature* »), la « pression » (« *pressure* ») et le « volume » (« *volume* ») d'un gaz donné, alors que k désigne une constante qui dépend de l'espèce chimique particulière du gaz en question (Provine 1986, p. 308), nous pouvons remarquer que son graphe se prête à être représenté sous la forme d'une surface de température que l'on peut comparer aux surfaces de *fitness*. Plus précisément, dans une telle surface, les axes qui mesurent, respectivement, les différents degrés de volume et de température définissent un plan qui est analogue au champ des possibles combinaisons de gènes dont parlait Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978), alors que l'axe qui représente la température permet, de même que l'axe qui mesure la *fitness* moyenne des différents génotypes dans le cas des paysages adaptatifs, de déterminer la hauteur ou la profondeur des différentes parties de ce même plan. Cela dit, il n'en demeure pas moins vrai que la surface de température que permet de définir la loi de Boyle et les paysages adaptatifs de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) diffèrent par deux aspects fondamentaux. Premièrement, les relations entre grandeurs physiques qu'exprime la loi de Boyle sont – sauf à la condition limite dans laquelle le gaz passe à l'état liquide – des relations linéaires (« *linear relationships* ») (Provine 1986, p. 308), alors que cela n'est pas nécessairement le cas lorsqu'il est question des relations que l'on peut établir entre les valeurs moyennes de *fitness* qui sont associées à différentes combinaisons de gènes, et cela précisément en raison des interactions épistatiques dont la théorie de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) visait justement à rendre compte. En témoigne l'équation différentielle décrivant « la distribution des fréquences géniques dans les populations » (« *the distribution of gene frequencies in populations* ») (Wright 1935, 1937a, 1937b) que ce dernier a fini par proposer en tant que possible description analytique d'un paysage adaptatif :

$$\Delta q = -uq + v(1 - q) - m(q - q_t) + \frac{q(1 - q)}{2} \frac{\partial}{\partial q} \log \bar{W}$$

(Wright 1937a ; Wright & Provine 1986, p. 234), où q , u et v représentent, respectivement, la fréquence d'une certaine variante allélique du gène que l'on est en train de considérer, le taux des mutations qui transforment une telle variante dans l'un des autres allèles de ce même gène et le taux des mutations qui vont dans le sens contraire (des allèles alternatifs à la variante en question), alors que m désigne « le nombre effectif d'échanges entre la population locale considérée et l'espèce [à laquelle elle appartient], prise dans son ensemble » (« *the effective amount of exchange between the local population under consideration and the species as a whole* »), en sachant que la fréquence de l'allèle en question au sein d'une telle espèce est égale à q_t , et \bar{W} représente la valeur de *fitness* moyenne de « le vecteur de génotypes qui caractérise [cette même] population » (« *the array of genotypes characteristic of this population* ») (Wright 1937a ; Wright & Provine 1986, p. 234). Comme nous pouvons l'observer, il s'agit bien d'une équation qui établit une relation entre la variation de la fréquence d'un gène donné (Δq) et l'action de trois facteurs évolutifs, à savoir la mutation ($-uq + v(1 - q)$), la migration ($-m(q - q_t)$) et la sélection naturelle ($\frac{q(1-q)}{2} \frac{\partial}{\partial q} \log \bar{W}$). Cependant, si nous la considérons en tant que fonction de \bar{W} , nous pouvons nous apercevoir qu'il s'agit d'une approximation log-linéaire d'un système d'équations qui décrivent chacune l'effet additif d'« une seule et même série d'allèles » (« *a single series of alleles* »), située au *locus* indexé par la lettre i , et qui sont de la forme

$$\Delta q_i = \frac{q_i(1 - q_i)}{2\bar{w}} \frac{\partial \bar{w}}{\partial q_i}$$

(Wright 1937b ; Wright & Provine 1986, p. 239). Il en découle que l'équation, pour ainsi dire, « cinétique » que Wright (1935, 1937a, 1937b) a lui-même formulée dans le but de fournir une description analytique du modèle (géométrique) du paysage adaptatif présuppose l'existence d'une relation non-linéaire entre fréquences géniques, et donc également fréquences génotypiques, et valeurs de *fitness*, ce qui empêche d'attribuer une interprétation algébrique simple à ce même modèle.

Deuxièmement, comme l'a pu remarquer Provine (1986), la manière dont Wright (1932) décrivait la nature des paysages adaptatifs dans son article de 1932 nous laisse entendre que les relations qui engendreraient de telles surfaces seraient des relations entre des nombres très larges, mais discrets, de combinaisons harmonieuses de gènes coadaptés et les différentes valeurs uniques de *fitness* moyenne que l'on pourrait assigner à ces dernières. Autrement dit, il ne s'agirait pas de relations entre des grandeurs continues telles que le volume, la pression et la température d'un gaz, comme c'est le cas en ce qui concerne la loi de Boyle, mais de relations entre une grandeur discrète (c'est-à-dire les diverses combinaisons de gènes possibles) et une grandeur continue (c'est-à-dire les diverses valeurs

moyennes de *fitness*). Des relations fonctionnelles d'une telle nature ne sauraient, cependant, être associées à des graphes qui prennent la forme de surfaces continues, car tout champ que l'on pourrait définir, en tant que substrat de telle ou telle surface de *fitness*, sur la base d'un nombre discret de combinaisons de gènes serait nécessairement un champ discontinu. Cette considération s'avère problématique pour l'interprétation des paysages adaptatifs de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) en ceci que, comme l'a souligné encore une fois Provine (1986), « les diagrammes [que l'on trouve dans l'article de 1932] représentent une surface bien continue de valeurs sélectives de combinaisons génotypiques uniques [*a nicely continuous surface of selective value of individual genotypic combinations*'] ; la méthode qu'utilisait Wright pour générer une telle surface produit, en fait, un résultat qui est inintelligible [*an unintelligible result*'] » (Provine 1986, p. 310). Afin de résoudre un tel problème, et de « sauver » ainsi les paysages adaptatifs tels que les a conçus Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978), il serait donc nécessaire de changer la nature des axes qui représentent les différentes combinaisons de gènes, en remplaçant ces dernières soit par des combinaisons de « caractères phénotypiques qui varient de manière continue » (« *continuously varying phenotypic characters* ») (Provine 1986, p. 311), comme a fini par le suggérer Wright lui-même, en 1985, suite aux objections de Provine (Provine 1986, p. 311), soit par des fréquences de gènes uniques qui varient, toujours de manière continue, entre 0 et 1. Dans ce dernier cas de figure, la représentation géométrique que l'on peut associer au graphe de la relation fonctionnelle dont il est question résulte de la mise en correspondance de valeurs moyennes de *fitness* avec des combinaisons de fréquences géniques qui ne représentent, par conséquent, pas des génotypes uniques, puisque chacune d'entre elles est associée à « une seule et même constitution génétique [possible] d'une population entière » (« *one genetic constitution of an entire population* ») (Provine 1986, p. 311), c'est-à-dire à un seul et même *pool* génétique. Il en découle qu'une telle représentation constitue bien une surface, puisque les relations fonctionnelles qui la sous-tendent sont des relations qu'entretiennent des variables qui sont toutes de nature continue, à savoir des fréquences géniques et des valeurs moyennes de *fitness*. D'ailleurs c'est précisément une telle formulation alternative du modèle du paysage adaptatifs que l'on peut trouver dans un article datant de 1978, où Wright (1978) présente, pour la première fois, un résumé de sa propre théorie de l'équilibre fluctuant. Mais est-ce qu'une telle solution permet-elle, effectivement, de surmonter le problème que nous venons de relever en ce qui concerne les champs de combinaisons géniques ? Pour répondre à cette autre question, nous pouvons remarquer que, contrairement à ce qui vaut pour les génotypes en tant que combinaisons harmonieuses de gènes, il est impossible d'assigner une valeur de *fitness*, ou valeur adaptative, unique à une seule et même combinaison de fréquences géniques, quand bien même l'on ferait l'hypothèse que les conditions environnementales

demeureraient inchangées (Provine 1986, p. 311)³⁵⁶. Une telle différence de nature entre les génotypes et les ensembles de fréquences géniques, en tant que variables évolutives, n'est rien d'autre qu'une conséquence de ces mêmes interactions épistatiques que Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) visait à prendre en compte au moyen de sa théorie de l'équilibre fluctuant, puisque les valeurs adaptatives uniques que l'on peut attribuer aux premiers intègrent, justement, les effets de telles interactions, alors que cela n'est pas le cas pour les valeurs que l'on peut assigner aux seconds. C'est pourquoi, à la lumière des considérations que nous venons d'évoquer au sujet de la nature des variables dont les valeurs sont représentées par les axes des paysages adaptatifs et des conclusions sur la nature des relations fonctionnelles qui sous-tendent ces mêmes modèles que nous avons tirées plus haut, nous pouvons en conclure, comme le faisait Jean Gayon (1992), que, du moins « dans sa version publique initiale, la notion de surface adaptative n'a pas un sens algébrique univoque. Elle est en revanche une vulgarisation saisissante de la 'théorie de l'équilibre fluctuant', élaborée un an plus tôt [c'est-à-dire en 1931] dans un texte beaucoup plus rigoureux, mais aussi beaucoup plus hermétique [Wright (1931a)] » (Gayon 1992, p. 358). Cela dit, quelles sont les implications de cette conclusion pour notre analyse de la manière dont Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) s'est réapproprié le modèle du paysage adaptatif ?

En ce qui concerne, plus spécifiquement, la troisième version de *Genetics and the Origin of Species* – que Gould (1983) considérait, justement, comme marquant le tournant adaptationniste de son auteur –, Dobzhansky (1951) y affirme explicitement que le modèle du paysage adaptatif de Wright (1932) permet de formuler « l'hypothèse de travail » (« *working hypothesis* ») d'après laquelle l'« adaptation aux conditions environnementales » (« *adaptation to the environment* ») serait « causalement reliée » (« *causally related* ») à la diversité (« *diversity* ») du vivant, c'est-à-dire à l'existence d'une pluralité de combinaisons de traits phénotypiques, étant donné un certain nombre de caractères³⁵⁷, qui correspondent à autant de combinaisons géniques distinctes, ainsi qu'à sa « discontinuité » (« *discontinuity* »), c'est-à-dire à l'existence de groupes distincts d'espèces ou de *taxa* supérieurs (Dobzhansky 1951, p. 8). Mais en quoi consisterait, plus précisément, ce lien causal ? Afin de répondre à une telle question, nous pouvons avant tout observer que, aux yeux de Dobzhansky (1951),

³⁵⁶ « Il se pourrait qu'un seul et même ensemble de fréquences géniques [*a single set of gene frequencies*] ait une valeur adaptative très élevée dans le contexte d'un vecteur particulier de combinaisons de gènes [*a very high adaptive value in one array of gene combinations*] et une valeur très faible dans celui d'un autre vecteur de combinaisons de gènes [*a very low one in another array of gene combinations*] » (Provine 1986, p. 311).

³⁵⁷ De même qu'un seul et même *locus* chromosomique peut être occupé par plusieurs allèles alternatifs, un seul et même caractère (par exemple, le caractère « couleur des yeux ») peut présenter plusieurs traits alternatifs (par exemple, les traits « yeux bleus », « yeux verts », etc.).

le modèle du paysage adaptatif lui offrait les moyens de représenter le monde vivant non pas comme étant « une masse informe de gènes et de traits phénotypiques combinés au hasard » (« *a formless mass of randomly combining genes and traits* »), mais comme consistant en « un grand nombre de familles de combinaisons de gènes qui sont apparentées les unes aux autres et qui sont regroupées sur un nombre vaste, mais fini, de pics adaptatifs » (« *a great array of families of related gene combinations, which are clustered on a large but finite number of adaptive peaks* ») (Dobzhansky 1951, p. 10), si bien que « chaque espèce vivante peut être envisagée comme occupant l'un des pics qui sont disponibles dans le champ des combinaisons géniques » (« *each living species may be thought of as occupying one of the available peaks in the field of gene combinations* ») (Dobzhansky 1951, p. 10). Ces derniers seraient, à leur tour, une conséquence du fait que la grande majorité de toutes les possibles combinaisons géniques « sont discordantes et inaptées à la survie dans n'importe quel environnement » (« *are discordant and unfit for survival in any environment* ») et que les combinaisons restantes « sont [plus ou moins] aptes à occuper certains habitats et certaines niches écologiques » (« *are suitable for occupation of certain habitats and ecological niches* ») (Dobzhansky 1951, p. 8). En conséquence, les pics que l'on peut identifier dans le paysage adaptatif de telle ou telle espèce, ou de tel ou tel groupe d'espèces, ne seraient rien d'autre que la représentation de « groupes de combinaisons de gènes apparentés qui font en sorte que les organismes qui les possèdent soient en mesure d'occuper certaines niches écologiques » (« *groups of related combinations of genes, which make the organisms that possess them able to occupy certain ecological niches* ») (Dobzhansky 1951, p. 8), c'est-à-dire qu'ils puissent jouir d'un certain avantage adaptatif, aussi minime soit-il, dans les conditions environnementales données. Dobzhansky (1951) précisait, en outre, que de tels pics ne seraient pas dispersés, puisque « des pics adaptatifs 'adjacents' [*adjacent adaptive peaks*'] [seraient] disposés en groupes que l'on peut comparer à des chaînes montagneuses [*may be likened to mountain ranges*'] dans lesquelles les différents pinacles sont séparés par des creux relativement peu profonds [*the separate pinnacles are divided by relatively shallow notches*'] » (Dobzhansky 1951, p. 10). Il en déduisait, ainsi, qu'il serait possible de répondre à la question de savoir pourquoi les espaces morphologiques que l'on peut associer à différentes classes d'organismes se présentent comme étant « agglomérés » (« *clumped* ») autour d'un certain nombre de groupes (« *clusters* ») d'espèces qui sont distincts les uns des autres. L'on peut distinguer, par exemple, la famille des félidés (*Felidae*) de la famille des canidés (*Canidae*), ou encore de celle des ursidés (*Ursidae*), sans que l'on puisse observer un continuum de variabilité morphologique entre une famille et l'autre. De plus, ces trois groupes distincts, mais adjacents, constituent un groupe discontinu plus grands, c'est-à-dire l'ordre des carnivores (*Carnivora*), qui est, à son tour, séparés d'autres groupes discontinus, tels que l'ordre des rongeurs (*Rodentia*), l'ordre des primates (*Primates*

Linnaeus), et ainsi de suite. La réponse que Dobzhansky (1951) apportait à une telle question consistait à supposer que chacun des groupes adjacents correspondrait à un pic adaptatif dans un paysage qui décrirait les trajectoires évolutives d'espèces différentes au sein d'une seule et même famille, et que, par conséquent, les espaces inoccupés entre les différents groupes constituent autant de vallées adaptatives de ce même paysage. Il en découle que, dans une telle perspective, les différents groupes de pics adjacents correspondraient aux ordres que l'on peut identifier au sein d'une seule et même classe, ce qui permettrait ainsi de visualiser l'espace morphologique qui sépare ces derniers les uns des autres comme constituant une série de vallées qui séparent des « chaînes de montages » (« *ranges* ») (Dobzhansky 1951, p. 10) distinctes au sein d'un seul et même paysage adaptatif. Par conséquent, c'était précisément sur la base d'une telle chaîne de raisonnements que Dobzhansky (1951) pouvait en conclure que « la nature hiérarchique de la classification biologique » (« *the hierarchic nature of the biological classification* ») ne serait rien d'autre que le reflet de « la discontinuité objectivement vérifiable des niches adaptatives » (« *the objectively ascertainable discontinuity of adaptive niches* ») (Dobzhansky 1951, p. 10), c'est-à-dire de l'adaptation de différents génotypes à différentes conditions environnementales. C'est en cela que consisterait le lien causal entre la discontinuité et la diversité du vivant, d'une part, ainsi que l'adaptation à l'environnement, d'autre part, dont Dobzhansky (1951) présupposait l'existence. Mais en quoi le modèle du paysage adaptatif aurait-il donc permis à Dobzhansky (1951) d'établir précisément un tel lien ?

Il est évident que Dobzhansky (1951) appliquait le modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932) à deux niveaux d'analyse différents. Premièrement, il l'appliquait à un niveau génétique, c'est-à-dire au niveau des combinaisons des gènes (les génotypes) dont se compose le *pool* génétique de telle ou telle population et qui constituent, ainsi, le fondement même de la diversité du vivant. Deuxièmement, il l'appliquait également à un niveau phénotypique, c'est-à-dire au niveau des diverses combinaisons de traits phénotypiques qui permettent de classer les différents organismes dans telle ou telle catégorie taxonomique, qu'il s'agisse d'une espèce ou d'un *taxon* supérieur, et qui constituent, ainsi, le fondement même de la discontinuité du vivant. Il faut, néanmoins, remarquer qu'il existait une différence essentielle entre ces deux usages possibles des paysages adaptatifs. Dans le premier cas, il s'agissait, en effet, d'une application explicite du modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932), tel que ce dernier l'avait lui-même conçu, à l'étude de la diversité génétique en tant que ressort des processus évolutifs. Dans l'autre cas, il s'agissait, en revanche, d'une application de ce même modèle à l'étude de la discontinuité phénotypique permettant aux biologistes de dresser des classifications hiérarchiques du monde vivant qui était de nature implicite, puisque les différentes combinaisons possibles de traits phénotypiques (ou les différentes fréquences de ces mêmes traits) n'apparaissent

jamais, en tant que variables explicites, dans le modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932), c'est-à-dire ni dans sa représentation géométrique, ni dans les possibles traductions algébriques de cette dernière. C'est pourquoi, afin de se servir du modèle du paysage adaptatif afin d'établir le lien entre diversité et discontinuité que nous avons identifié plus haut, Dobzhansky (1951) était, pour ainsi dire, « contraint » d'y introduire ces autres variables de manière, justement, implicite, et plus précisément en émettant l'hypothèse que les différents pics adaptatifs coïncideraient avec autant de niches écologiques distinctes. En termes plus formels, nous pouvons en conclure que Dobzhansky (1951) se servait du modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932) pour établir une sorte d'isomorphisme informel entre deux classes de paysages adaptatifs, à savoir « les paysages (adaptatifs) génétiques » (« *genetic landscapes* ») et les paysages (adaptatifs) phénotypiques » (« *phenotypic landscapes* ») (Dietrich & Skipper Jr. 2012), ce qui lui permettait d'envisager la diversité et la discontinuité des formes organiques comme étant le résultat de la mise en correspondance de ce que nous pourrions décrire comme étant deux champs de représentation d'objets biologiques aux surfaces « rugueuses » (« *rugged* ») (Dobzhansky 1951). Plus précisément, il s'agirait, d'une part, du champ multidimensionnel de toutes les possibles combinaisons génotypiques d'allèles alternatifs, pour des *loci* distincts, qui sont séparées les unes des autres par un nombre discret de substitutions de gènes, ainsi que, d'autre part, du champ que constitue « l'immense variété d'environnements et de niches écologiques qui existent sur terre » (« *the immense variety of environments and of ecological niches which exist on earth* ») (Dobzhansky 1951, p. 9). Un tel isomorphisme repose, à son tour, sur le fait que les deux paysages adaptatifs en question, et donc les deux champs de représentation que nous pourrions leur associer, possèdent une dimension en commun, c'est-à-dire la dimension des valeurs de *fitness*, ou des valeurs adaptatives. Cela dit, qu'entendait, plus précisément, Dobzhansky (1951) par « valeur adaptative » ou valeur de « *fitness* darwinienne » (« *Darwinian fitness* ») ?

Pour répondre à cette question, nous pouvons tout simplement remarquer que Dobzhansky (1951) définissait la valeur adaptative que l'on pourrait attribuer à un organisme donné en faisant référence au génotype de ce dernier, et plus précisément comme étant « un concept statistique qui représente l'efficacité reproductive de tel ou tel génotype dans un certain environnement » (« *a statistical concept that epitomizes the reproductive efficiency of a genotype in a certain environment* ») (Dobzhansky 1951, p. 78), en ceci qu'il permet d'en mesurer, pour ainsi dire, la « capacité reproductive ». Par « capacité reproductive », il faut entendre, notamment, « la capacité relative des porteurs d'un génotype donné à transmettre leurs gènes au *pool* génétique des générations suivantes » (« *the relative capacity of carriers of a given genotype to transmit their genes to the gene pool of the*

following generations ») (Dobzhansky 1951, p. 78)³⁵⁸. En cela, Dobzhansky (1951) rejoignait ainsi les vues que Wright (1930) lui-même avait exprimées au sujet du concept de valeur de *fitness* – c’est-à-dire l’idée que la valeur de *fitness* darwinienne serait une propriété des organismes qui est fortement influencée par les interactions entre les gènes, telles que les relations de dominance ou les relations épistatiques – et qui s’opposaient, comme nous l’avons vu plus haut, à la manière dont Fisher (1930) envisageait ce même concept – c’est-à-dire en mettant, au contraire, l’accent sur le rôle des effets additifs qu’exerce tel ou tel gène sur la valeur adaptative d’un organisme donné. Par conséquent, aussi bien aux yeux de Dobzhansky (1951) qu’à ceux de Wright (1931a, 1931b, 1932), ce qui définirait la topographie d’un paysage adaptatif serait précisément les valeurs de *fitness* darwinienne qui sont associées aux différents génotypes possibles, relativement à certaines conditions environnementales locales. Il s’ensuit que, du point de vue du premier comme de celui du second, ce qui pousserait les espèces vers des pics adaptatifs ou, alternativement, dans des vallées adaptatives serait précisément la sélection naturelle, en ceci qu’elle agirait sur la diversité génétique que comporte l’existence de populations d’organismes, et notamment de populations de petite taille, qui font face à différentes conditions environnementales locales, en favorisant les combinaisons géniques qui sont associées à des valeurs adaptatives qui sont même légèrement plus élevées que les autres. Le point sur lequel Dobzhansky (1951) s’écartait de Wright (1931a, 1931b, 1932) était donc l’extension de l’approche de l’évolution que sous-tendait le modèle du paysage adaptatif à l’explication des fondements évolutifs de l’ordre hiérarchique que les naturalistes identifiaient dans le monde organique, par l’intermédiaire de l’isomorphisme informel entre paysages génétiques et paysages phénotypiques que nous avons décrit plus haut. En conséquence, c’est précisément en vertu de la manière dont Dobzhansky (1951) s’était approprié du modèle du paysage adaptatif pour en étendre la portée heuristique – de la manière que nous venons de préciser – que Gould (1983) pouvait avancer l’objection que l’interprétation que ce dernier en avait donnée impliquait une conception strictement adaptationniste de l’évolution. Gould (1983) observait, en effet, que l’extension du modèle du paysage adaptatif qu’avait prônée Dobzhansky (1951), du moins à partir de 1951, reposait sur le

³⁵⁸ Dobzhansky (1951) précisait, ensuite, que « la valeur adaptative est évidemment influencée par la capacité de survie d’un [géno-]type donné [*the ability of a type to survive*’]. La valeur adaptative d’un [génotype] homozygote pour un gène létal est évidemment nulle. Mais la vigueur somatique de l’individu, [c’est-à-dire] sa viabilité [*the individual’s somatic vigor, its viability*’], n’est que l’une parmi les variables qui en déterminent la valeur adaptative. La durée de la période reproductive, le nombre d’œufs produits (fécondité), l’intensité de la pulsion sexuelle chez les animaux [*the intensity of the sexual drive in animals*’], l’efficacité des mécanismes qui contribuent à la réussite de la pollination chez les plantes [*the efficiency of the mechanisms which conduce to successful pollination in plants*’] et bien d’autres variables encore jouent également un rôle important » (Dobzhansky 1978, p. 78).

présupposé que l'espace écologique serait constitué de « places optimales » (« *optimal places* ») qui préexisteraient aux organismes eux-mêmes et qui correspondraient à autant de « conceptions organiques » (« *designs* »), elles-mêmes optimales. D'une telle hypothèse, l'on pouvait donc en conclure que, « si l'évolution a engendré un groupe de chats, c'est parce qu'il existe dans l'économie de la nature [*the economy of nature*] une chaîne de montagnes adaptative [*adaptive range*] parsemée de pics adjacents qui attendent, pour ainsi dire, d'être découverts et exploités par des créatures » (Gould 1983, p. 79). Ce faisant, poursuivait Gould (1983), Dobzhansky (1951) aurait donc fini par renverser la fonction originaire du modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932), qui consistait moins à souligner le rôle que jouent les processus d'adaptation dans la diversification des *taxa* supérieurs en groupes discontinus qu'à mettre en valeur le poids des facteurs non adaptatifs dans la genèse et dans le maintien de la variabilité intraspécifique : alors que, en 1951, Dobzhansky (1951) présentait les pics adaptatifs adjacents comme autant d'*optima* individuels propres à des espèces voisines, Wright (1931a, 1931b, 1932) les avait plutôt envisagés comme étant des états suboptimaux, auxquels peuvent tendre des dèmes qui appartiennent à une seule et même espèce précisément lorsqu'ils s'éloignent de l'*optimum* qui est propre à cette dernière, par l'effet de facteurs non adaptatifs tels que la dérive génétique aléatoire (Gould 1983, p. 79)³⁵⁹.

Nous pouvons donc en conclure que le cas particulier de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) nous permet d'affirmer que le « durcissement » de la Synthèse Moderne dont parlait Gould (1983) avait bien été une conséquence de la manière dont les modèles mathématiques de la génétique des populations, dite « classique », avaient encadré le processus de synthèse qui avait consisté à fédérer différentes branches des sciences de la vie – et notamment la systématique, la paléontologie et la génétique des populations naturelles – autour d'un noyau théorique unitaire. Plus précisément, il nous permet de montrer en quoi le modèle du paysage adaptatif de Wright (1931a, 1931b, 1932) a permis à Dobzhansky (1951) d'établir un lien entre la systématique évolutive, d'une part, et la génétique des populations, d'autre part, en étendant la théorie génétique de l'évolution dont ce même modèle constitue une sorte de formulation heuristique, c'est-à-dire la théorie de l'équilibre fluctuant qu'avait formulée Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978) lui-même. Comme nous venons de le voir, un tel lien consiste dans un isomorphisme informel entre deux classes de paysages adaptatifs, à savoir les

³⁵⁹ En d'autres termes, selon les critiques de Gould (1983), alors que Dobzhansky (1951) s'était servi du modèle du paysage adaptatif pour répondre à la question de savoir en quoi des *taxa* se diversifient, en leur propre sein et de manière discontinue, en groupes de *taxa* de rang inférieur par la présence de différents *optima* spécifiques, et donc par l'effet d'adaptations aux conditions environnementales, Wright (1931a, 1931b, 1932) l'avait originellement utilisé pour expliquer la diversification de petites populations locales au sein d'une seule et même espèce en dépit de l'existence d'un *optimum* spécifique, et donc par l'effet de facteurs non adaptatifs (Gould 1983, p. 79).

paysages génétiques qui permettent de visualiser les diverses valeurs adaptatives moyennes que l'on peut attribuer aux combinaisons géniques dont se compose le *pool* génétique de telle ou telle population, voire de tel ou tel groupe de populations, et les paysages phylogénétiques qui représentent les valeurs adaptatives moyennes des combinaisons de traits phénotypiques qui correspondent à ces mêmes combinaisons géniques (c'est-à-dire à ces mêmes génotypes), relativement à un certain ensemble de conditions environnementales différenciées. Cet isomorphisme repose donc sur le fait que les deux classes de modèles géométriques en question possèdent une dimension commune, c'est-à-dire la dimension qui représente les différentes valeurs adaptatives moyennes, ou valeurs moyennes de *fitness* darwinienne, des combinaisons géniques ou phénotypiques que l'on est en train de considérer. Par conséquent, c'est justement sur la base de cette dimension commune que Dobzhansky (1951) a pu étendre la théorie de l'équilibre fluctuant afin d'expliquer les différences phénotypiques, de nature – du moins partiellement – adaptative, qui permettent de séparer les diverses espèces, ou les divers *taxa* supérieurs, dont se composent les classifications hiérarchiques des naturalistes, alors que Wright (1931a, 1931b, 1932) l'avait originellement conçue dans le but de rendre compte des différences intraspécifique, c'est-à-dire entre les groupes locaux qui constituent une espèce donnée, que l'on impute généralement à des processus non-adaptatifs tels que, justement, la dérive génétique aléatoire. Plus précisément, toujours comme nous l'avons vu plus haut, Dobzhansky (1951) a pu mobiliser la théorie de l'équilibre fluctuant pour l'appliquer « à un niveau hiérarchique » (« *to a hierarchical level* ») autre que celui qu'avait visé Wright (1931a, 1931b, 1932) lui-même (Gould 1983, p. 79)³⁶⁰ parce qu'il est parvenu à mettre en relation les différents pics adaptatifs que l'on peut

³⁶⁰ Cela dit, comme l'a montré Provine (1986), l'on peut avancer que l'interprétation adaptationniste de la théorie de l'équilibre fluctuant qu'a fini par donner Dobzhansky (1951) était, tout de même, cohérente avec la manière dont Wright (1931a, 1931b, 1932) lui-même l'avait conçue. « Depuis le début, Wright avait considéré sa propre théorie de l'équilibre fluctuant comme étant, en dernière instance, adaptative [*as ultimately adaptive*'], comme l'était, de toute évidence et par la force des choses, l'analogie avec les pratiques d'élevage domestique qui la sous-tendait [*as of course its analogy in domestic breeding was by necessity*'] (c'est-à-dire que la forme souhaitée de la race élevée était 'adaptative'). Plus spécifiquement, le processus [d'évolution par fluctuation de l'état d'équilibre d'une population donnée] était adaptative au niveau qui se situait au-dessus de l'action effective de la dérive génétique [*at the level above the effective action of random drift*']. Mais ce que disaient les systématiciens, à la fin des années 1920 et au début des années 1930, avait fait entendre à Wright que les différences entre espèces étaient non-adaptatives [*differences between species were non-adaptive*']. En conséquence, Wright avait ajusté 'l'équilibre' [*adjusted the 'balance*'] [entre les différents facteurs que considérait sa théorie de l'équilibre fluctuant] afin de mettre en valeur le contrôle qu'exerce la dérive génétique au niveau de l'espèce et aux niveaux inférieurs [*to favor the controlling action of random drift at the species level and below*'], alors qu'il avait continué de considérer que les niveaux sélectifs/adaptatifs étaient principalement ceux qui se situaient au-dessus du niveau de l'espèce [*the selective/adaptive levels being primarily those above the species level*'] » (Provine 1986, p. 455). C'est ainsi que « lorsque les systématiciens se sont ralliés à l'idée que les différences au niveau des espèces

identifier dans tel ou tel paysage génétique avec autant de niches écologiques. Ce faisant, Dobzhansky (1951) a donc fini par donner une interprétation adaptative de la signification biologique de ces mêmes pics, alors que Wright (1931a, 1931b, 1932) les avait envisagés comme étant une manifestation des interactions épistatiques entre des allèles qui occupent des *loci* distincts dans une seule et même combinaison génique. Plus précisément nous pouvons affirmer que, bien qu'il ne s'intéressât jamais à la valeur adaptative de traits isolés, Dobzhansky (1951) adoptait un principe heuristique qui était analogue au principe d'isolement fonctionnel que nous avons identifié dans notre analyse du programme adaptationniste, en ceci qu'il consistait à isoler différentes combinaisons géniques, ou phénotypiques, les unes des autres en fonction des pics adaptatifs distincts qu'elles occuperaient. De plus, comme nous l'avons observé plus haut, Dobzhansky (1951) tendait également à mobiliser une sorte de principe d'optimalité, en ceci qu'il regardait ces mêmes combinaisons géniques, ou phénotypiques, comme occupant des *optima* adaptatifs, en raison du lien très étroit qu'il établissait entre pics adaptatifs et niches écologiques. En conséquence, c'est précisément dans un tel sens que l'on peut qualifier d'« adaptationniste » le lien conceptuel qui existe entre la théorie génétique de l'évolution de Wright (1931a, 1931b, 1932, 1978), fondée sur les présupposés généraux de la génétique théorique des populations que nous avons décrit dans la section précédente, et le cadre conceptuel pour les sciences de la vie que Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) a fini par élaborer à partir du modèle du paysage adaptatif. Au vu de l'importance qu'ont revêtue l'ouvrage de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) et le modèle du paysage génétique (Dietrich & Skipper Jr. 2012) dans la formulation de la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, nous pouvons donc émettre l'hypothèse plus générale que les liens que l'on peut établir entre les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations et ce même cadre conceptuel consisteraient dans un ensemble de contraintes qui serait l'expression d'une conception adaptationniste de l'évolution. Cela dit, en quoi consisteraient, plus précisément, de telles contraintes ? Dans quelle mesure la définition de la notion même de cadre conceptuel que nous avons

et des sous-espèces étaient adaptatives plutôt que non-adaptatives » (« *as systematists moved toward the view that differences at the species and subspecies levels were adaptive rather than nonadaptive* ») et ils ont donc « cessé de considérer que la dérive aléatoire pouvait être la cause de telles différences » (« *they no longer thought random drift could cause those differences* »), « Wright...était de l'avis que sa théorie était renforcée, et absolument pas remise en question [*'his theory was enhanced, and not in any way hurt'*], par la découverte du fait que certaines différences entre espèces étaient adaptatives, plutôt que non-adaptatives. Tout ce que Wright avait à faire était de faire descendre sur l'échelle taxonomique le niveau auquel opérait la dérive génétique [*'to move downward on the taxonomic scale the level at which random drift was effective'*], ce qui était très simple à faire » (Provine 1986, p. 455).

déduit de la conception classique des théories scientifiques nous permettrait-elle d'en proposer une reconstruction formelle ?

Chapitre 2

La théorie synthétique de l'évolution : une théorie comme les autres ?

Les approches axiomatiques de la théorie de l'évolution, entre génétique et physique

Comme nous l'avons déjà évoqué en renvoyant aux analyses de Daniel J. Nicholson et Richard Gawne (2014, 2015), l'on considère généralement que la « philosophie de la biologie » (« *philosophy of biology* ») se serait constituée en tant que branche de la philosophie des sciences, pour ainsi dire, « moderne » à partir du début des années 1970. D'après un tel « récit traditionnel » des origines de la philosophie de la biologie, cette discipline se serait, en effet, construite sur la base d'une double opposition : d'une part, une opposition aux tentatives de conceptualisation philosophique du savoir biologique qui avaient été menées entre la moitié des années 1950 et la fin des années 1960 (Schaffner 1967, 1969a, 1969b ; Hull 1969, 1974 ; Wimsatt 1972a, 1972b, 1974 ; Ruse 1973, 2000)³⁶¹ ; d'autre part, de manière plus générale, une opposition à la tradition même de l'empirisme logique (Callebaut 1993, 2005)³⁶². Plus précisément, cette seconde opposition aurait été motivée par le fait que la

³⁶¹ Pour ne faire qu'un exemple, David L. Hull (1969) reprochait aux philosophes qu'il critiquait d'avoir ignoré aussi bien les phénomènes (c'est-à-dire les *explananda*) auxquels s'intéressaient les biologistes de l'évolution que les schémas explicatifs (c'est-à-dire les *explanantia*) dont ils se servaient pour en rendre compte, au profit de problématiques et de solutions qui étaient de nature plus strictement philosophique. L'un des exemples paradigmatiques qu'il présentait, dans le but d'étayer sa thèse, était celui de « la distinction entre le concept de *taxon* et le concept de catégorie » (« *the taxon-category distinction* ») (Hull 1969, p. 172). À son avis, en effet, alors que l'élucidation des « différences entre les individus, les classes et les classes de classes » (« *differences between individuals, classes, and classes of classes* ») aurait pu constituer un terrain d'entente pour les philosophes et les biologistes, l'occasion a finalement été perdue : d'une part, les philosophes qui ont tâché d'éclairer une telle distinction en se tournant vers la biologie – tels que Woodger (1937, 1939) – sont passés à côté des problèmes qui préoccupaient, à l'époque, les biologistes, comme la question des « différences entre le fait de définir le nom d'une espèce particulière (une classe) et le fait de définir le nom de la catégorie 'espèce' elle-même (une classe de classes) » (« *the differences between defining the name of a particular species (a class) and defining the name of the species category itself (a class of classes)* ») (Hull 1969, p. 172). C'est pourquoi, en concluait Hull (1969), « les biologistes ont dû élaborer par eux-mêmes les distinctions conceptuelles et la terminologie pertinentes » (« *biologists had to work out the appropriate distinctions and terminology for themselves* ») (Hull 1969, p. 173).

³⁶² Le récit des origines de la philosophie de la biologie que nous offre Werner Callebaut (2005) est exemplaire à cet égard : « La philosophie de la biologie, telle que je la comprends est devenue adulte [*'has come of age'*] seulement il y a trois décennies, lorsque les philosophes David Hull, Michael Ruse, William Wimsatt, et, un peu plus tardivement, John Beatty, William Bechtel, Robert Brandon, Richard Burian, Philip Kitcher, Robert Richardson, Alex Rosenberg et Elliott

conception classique des théories scientifiques – en tant que conception « orthodoxe » des théories scientifiques qui était propre à la tradition du Cercle de Vienne et de l’empirisme logique – aurait comporté l’adhésion à un « paradigme épistémologique » (Duchesneau 1997) qui prenait modèle sur les théories physiques et qui n’aurait donc pas été en mesure de rendre compte des spécificités de la biologie en tant que « science particulière » (« *special science* ») (Fodor 1974)³⁶³. Toujours d’après un tel récit des origines de la philosophie de la biologie, c’est précisément pour cette raison que,

Sober – la liste n’est pas exhaustive – commencèrent à travailler sérieusement sur des problèmes conceptuels qui avaient émergé des recherches biologiques contemporaines, notamment dans le domaine de l’évolution [*‘conceptual problems arising from contemporary biological research, especially in the field of evolution’*]...Leurs racines philosophiques, quoique fort différentes, étaient principalement ancrées dans la tradition analytique [*‘in the analytic tradition’*]. Les ‘reconstructions rationnelles’ d’épisodes de l’histoire des sciences que menaient leurs prédécesseurs positivistes ou poppériens reléguèrent les faits concrets à des notes de bas de page, pour ainsi dire [*‘The ‘rational reconstructions’ of episodes in the history of science by their positivist or Popperian forebears relegated the actual facts to footnotes, so to speak’*]...Ce qui caractérisait ces nouveaux philosophes de la biologie consistait en ceci qu’ils avaient acquis une véritable maîtrise des domaines scientifiques sur lesquels ils voulaient travailler [*‘they had all learned the area(s) of science they wanted to work on really well’*] (qui incluait la biologie cellulaire, l’écologie, la génétique, la biologie moléculaire, la systématique et la taxonomie, bien que l’évolution fût nettement prédominante) » (Callebaut 2005, p. 96). Il faut, néanmoins, rappeler – comme l’a observé Jean Gayon (2009a) – que toutes les figures que l’on peut associer à cette nouvelle philosophie de la biologie n’étaient pas nécessairement hostiles à la tradition de l’empirisme logique, comme en témoignent les écrits de Ruse (1973), Schaffner (1967, 1985, 1993) et Rosenberg (1985).

³⁶³ Les arguments par lesquels Jerry Fodor (1974) a défendu l’« hypothèse de travail » (« *working hypothesis* ») d’après laquelle la science formerait un réseau de disciplines particulières, et non pas un système unifié, sont emblématiques de la manière dont l’attention croissante que les philosophes des sciences ont commencé à porter, au cours des années 1970, aux spécificités de telle ou telle branche du savoir était ancrée dans une critique des présupposés fondamentaux de l’empirisme logique. Plus précisément, les critiques de Fodor (1974) se concentraient sur le lien conceptuel qu’établissaient, justement, les empiristes logiques entre le principe de l’unité de la science et la thèse d’après laquelle « toutes les théories vraies des sciences particulières devraient se réduire, sur la longue durée, aux théories de la physique » (« *all true theories in the special sciences should reduce to physical theories in the long run* ») (Fodor 1974, p. 97). C’est pourquoi, afin de montrer en quoi il serait impossible de considérer la science comme étant un système unifié, il visait à montrer que les lois et les classes d’objets fondamentales des différentes sciences particulières étaient irréductibles aux lois et aux classes d’objets fondamentales de la physique : « s’il existe des sciences particulières, ce n’est pas en raison de la nature de notre relation épistémique avec le monde, mais en raison de la façon dont le monde est construit [*‘not because of the nature of our epistemic relation to the world, but because of the way the world is put together’*] : toutes les espèces naturelles (c’est-à-dire toutes les classes de choses et d’événements au sujet desquels on peut établir des généralisations contrefactuelles de nature fondamentale) ne sont pas, ou ne correspondent pas à, des espèces naturelles de la physique [*‘not all natural kinds (not all the classes of things and events about which there are important, counterfactual supporting generalizations to make) are, or correspond to, physical natural kinds’*] » (Fodor 1974, p. 113).

malgré les travaux pionniers de J. H. Woodger (1937, 1939), la biologie aurait longtemps apparu « fondamentalement réfractaire à ce genre de mise en forme » (Duchesneau 1997, p. 311), si bien qu'elle aurait fini par être reléguée au second plan dans l'entreprise de reconstruction logique des théories scientifiques. Une telle situation aurait, justement, évolué à partir des années 1970, et cela pour deux raisons principales. Premièrement, la tentative d'appliquer la conception classique des théories scientifiques à l'analyse de théories beaucoup moins idéalisées que la mécanique classique aurait mis en évidence toute la complexité des structures nécessaires à leur reconstruction formelle (Duchesneau 1997)³⁶⁴. L'examen des théories biologiques aurait alors commencé à être considéré comme étant « susceptible de fournir des cas-tests pour la corroboration ou le rejet de nouveaux modèles [épistémologiques] moins inféodés aux conceptions positivistes et logicistes » (Duchesneau 1997, p. 311-312). Deuxièmement, la synthèse entre le principe de la sélection naturelle et le modèle mendélien des processus héréditaires aurait permis à la théorie (synthétique) de l'évolution de s'imposer en tant que théorie unifiée du vivant, et donc d'aspirer à un statut épistémologique qui se rapprocherait de celui dont a pu jouir la mécanique newtonienne dans le cadre de la physique classique (Smocovitis 1992).

Cela dit, il n'en demeure pas moins vrai que la conception classique des théories scientifiques a continué d'exercer une influence déterminante sur les débats qui se sont tenus tout au long de la Synthèse Moderne – et notamment au cours des périodes que nous avons qualifiées, respectivement, de « phase réflexive » et de « phase critique » – au sujet des critères qui permettraient de déterminer la « scientificité » des « études de l'évolution » (« *evolutionary studies* ») (Ruse 1973) qui en étaient issues, en tant que discipline indépendante et (quoique faiblement) structurée. Pour s'en apercevoir, il suffit de prendre en considération le chapitre que Michael Ruse (1973) a consacré, dans son manuel de philosophie de la biologie datant de 1973, au problème de la structure de « la version moderne de la théorie évolutionnaire de Darwin » (« *the modern version of Darwin's evolutionary theory* ») – c'est-à-dire, précisément, la « théorie 'synthétique' de l'évolution » (« *'synthetic' theory of evolution* ») – (Ruse 1973, p. 9). D'une part, ce chapitre s'ouvre, en effet, sur la question de savoir en quoi la théorie de l'évolution serait « une théorie comme la physique et la chimie » (« *a theory like physics and chemistry* ») (Ruse 1973, p. 49). D'autre part, il s'achève sur une autre question, que Ruse (1973) lui-même reliait étroitement à la première, c'est-à-dire celle de savoir si « une théorie de

³⁶⁴ « On a ainsi fait valoir, à la suite de [Patrick] Suppes, que les règles d'inférence qui commandent la déduction axiomatique requièrent à leur tour une dérivation axiomatique, qui de la logique des prédicats de premier ordre nous fait remonter à la théorie des groupes et à la théorie des ensembles. D'où l'extrême complexité de la structure formelle requise pour des théories qui s'appliquent à des objets syntaxiquement décrits de façon de plus en plus complexe et intégrée » (Duchesneau 1997, p. 321).

l'évolution axiomatique [c'est-à-dire une théorie de l'évolution qui soit (formellement) reconstruite sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques] est théoriquement impossible » (« *is an axiomatic evolutionary theory theoretically impossible ?* ») (Ruse 1973, p. 62). Plus précisément, le lien que Ruse (1973) établissait entre ces deux questions consistait à affirmer que la théorie de l'évolution serait une théorie structurellement analogue – quoique seulement en puissance et de manière incomplète – aux théories chimiques et physiques précisément parce que « [sa] partie la plus vitale...est axiomatisée » (« *the most vital part of the theory is axiomatized* ») (Ruse 1973, p. 49). De plus, toujours d'après Ruse (1973), cette partie la plus vitale serait également conforme à ce qu'il appelait lui-même « la position normalement connue sous le nom d'empirisme logique » (« *the position commonly known as 'logical empiricism'* ») (Ruse 1973, p. 10), et que nous pourrions identifier comme étant l'ensemble des « canons » concernant la construction de systèmes théoriques qui découlent de la conception classique des théories scientifiques. Cela serait d'autant plus vrai que, dans la théorie (synthétique) de l'évolution, l'on pourrait trouver « mention d'entités théoriques (non-observables, etc.), ainsi que d'entités non-théoriques (observables, etc.) » (« *reference to theoretical (non-observable, etc.) entities as well as to non-theoretical (observable, etc.) entities* »). Il serait également possible, poursuivait Ruse (1973), d'y déceler également des « principes pont » (« *bridge principles* »), c'est-à-dire des règles, ou des postulats, de correspondance, etc. (Ruse 1973, p. 49). Cependant, en quoi consisterait cette « partie plus vitale » de la théorie de l'évolution, c'est-à-dire le volet de la théorie de l'évolution que Ruse (1973) considérait comme étant son noyau conceptuel ? Pour quelle raison Ruse (1973) estimait-il que le fait qu'un tel noyau conceptuel soit axiomatisé rendrait la théorie de l'évolution, dans son ensemble, une théorie qui « partage beaucoup des caractéristiques qui sont propres aux sciences physiques » (« *shares many of the features of the physical sciences* ») (Ruse 1973, p. 49) ?

Comme première chose, nous pouvons observer que, par « théorie de l'évolution » (« *theory of evolution* »), Ruse (1973) entendait, justement, les « études de l'évolution » en tant qu'ensemble de disciplines indépendantes, telles que la systématique, la morphologie, l'embryologie ou la paléontologie. Il s'agissait, à ses yeux, de sciences qui possédaient, chacune, leurs propres *explananda* et leurs propres *explanantia*, mais qui partageaient un seul et même « fond » (« *background knowledge* ») commun (Ruse 1973, p. 48), puisqu'elles portaient sur des phénomènes qui n'étaient, en définitive, rien d'autre que « l'effet cumulatif et à long terme de processus qui engendrent les changements héréditaires les plus petits » (« *the long-term cumulative effect of processes which bring about the smallest heritable changes* ») (Ruse 1973, p. 48). Dans une telle perspective, le fond commun de toutes ces sciences – c'est-à-dire le noyau théorique qui permettrait de les relier les unes aux autres – ne serait, par conséquent, rien d'autre que la génétique des populations, en tant

que science qui étudie les petits changements génétiques dont la transmission et l'accumulation d'une génération à l'autre constituent le substrat des grandes tendances évolutives, telles que, par exemple, l'évolution, par descendance d'un ancêtre commun, des différents *taxa* supérieurs (Ruse 1973, p. 48)³⁶⁵. Autrement dit, la théorie de l'évolution telle que la concevait Ruse (1973) ne serait rien d'autre que ce que nous avons appelé, dans les sections précédentes, « la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie », alors que la génétique des populations, toujours telle que l'envisageait ce dernier, coïnciderait avec le versant de la théorie synthétique que nous avons qualifié de « théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle ». Nous pouvons en déduire que Ruse (1973) présentait la théorie (synthétique) de l'évolution de la même manière dont Gould (2002) décrivait les résultats des dernières phases de la Synthèse Moderne, c'est-à-dire comme étant le produit d'un processus de synthèse qui aurait consisté à fédérer différentes branches des sciences de la vie autour du noyau conceptuel qu'aurait constitué la génétique théorique des populations, d'après le schéma hiérarchique qu'illustre le diagramme à la figure (16). Ce faisant, Ruse (1973) s'opposait explicitement à la description de la structure de la théorie (synthétique) de l'évolution qu'avait esquissée Morton Beckner (1959). Ce dernier la concevait, en effet, comme étant



Figure 16 : Diagramme qui représente la structure de la théorie (synthétique) de l'évolution (en tant que cadre conceptuel) telle que la concevait Michael Ruse (1973, p. 49). Les lignes doubles représentent les liens formels entre la génétique (théorique) des populations et les autres branches des sciences de la vie

« une famille de modèles apparentés » (« *a family of related models* ») où « les différents modèles de la théorie fournissent des éléments de preuve à l'appui des [présupposés des] modèles voisins » (« *the various models in the theory provide evidential support for their neighbors* »), si bien qu'elle serait

³⁶⁵ Comme l'a observé Paul Thompson (1989), les arguments de Ruse (1973) « sont de nature extrapolationniste [*'extrapolationist in character'*], c'est-à-dire qu'[ils présupposent] qu'il est possible d'extrapoler les mécanismes causaux qui sous-tendent les changements évolutifs à vaste échelle à partir des mécanismes causaux qui sous-tendent le changement à petite échelle [*'the causal mechanisms underlying large-scale evolutionary changes can be extrapolated from the causal mechanisms underlying small-scale change'*], parce que les phénomènes à vaste échelle ne sont rien d'autre que l'effet cumulatif de changements à petite échelle. Ce qui découle, bien évidemment, d'un tel présupposé est que la génétique théorique des populations est le noyau de la théorie de l'évolution [*'population genetic theory is the core of evolutionary theory'*] » (Thompson 1989, p. 54).

« moins ‘linéaire’ que, par exemple, la théorie physique, et plus ‘réticulée’ » (« *less ‘linear’ than e.g. physical theory, and is more ‘reticulate’* ») (Beckner 1959, p. 160 ; cité par Ruse 1973, p. 51). Plus

précisément, Beckner (1959) estimait que le pouvoir explicatif de la théorie de l’évolution consisterait en ceci qu’elle permettrait d’unifier les différents modèles dont elle se compose et qui s’appliquent aux différentes questions que pose « le fait de l’évolution » (« *the fact of evolution* ») – telles que « l’origine des espèces et des taxa de rang supérieur, les taux



Figure 17 : Diagramme qui représente la structure de la théorie (synthétique) de l’évolution (en tant que cadre conceptuel) telle que la concevait Morton Beckner (1959), d’après Michael Ruse (1973, p. 51)

des changements évolutifs, le développement d’adaptations, etc. » (« *the origin of species and of the taxa of higher rank, the rates of evolutionary change, the development of adaptations, etc.* ») – (Beckner 1959, p. 161) sur la base de trois facteurs majeurs : premièrement, « une classe de principes qui apparaissent souvent dans les modèles évolutifs les plus divers » (« *a class of principles that appear frequently in evolutionary models of the most diverse sorts* ») et qui comprennent, notamment, les lois de la génétique mendélienne et de la génétique des populations (Beckner 1959, p. 161-162) ; deuxièmement, « des types spécifiques d’hypothèses subsidiaires » (« *specific types of subsidiary hypotheses* ») qui permettent d’appliquer les principes fondamentaux des différents modèles évolutifs aux situations les plus diverses, comme des hypothèses au sujet du « système de reproduction » (« *breeding system* ») qu’adopte telle ou telle population, au sujet des taux de mutation et des taux de migration, etc. ; troisièmement, un nombre restreint de règles qui rendent possible « l’introduction d’hypothèses simplificatrices et d’hypothèses subsidiaires » (« *the introduction of simplifying assumptions and subsidiary hypotheses* »), puisqu’elles permettent de distinguer « les facteurs qu’il est nécessaire de prendre en considération lorsqu’on construit des modèles » (« *the factors that need to be taken into account in the construction of models* ») de ceux qu’il est possible d’ignorer (Beckner 1959, p. 162). Il en découle que, comme nous pouvons le constater en observant les diagrammes à la figure (16) et à la figure (17), alors que Beckner (1959) estimait que les principes de la génétique des populations seraient certes fondamentaux, mais qu’ils ne formeraient que l’une des composantes d’un vaste réseau conceptuel, Ruse (1973) assignait une place fondamentale à la génétique (théorique) des populations en tant que branches des études évolutives. Il la considérait, en effet, comme étant située à un niveau plus fondamental que celui auquel se trouveraient les différents systèmes de lois, de

généralisations empiriques ou de modèles dont on peut se servir pour représenter la structure et le contenu des autres branches des études de l'évolution.

C'est pourquoi Ruse (1973) pouvait donc en conclure que le fait que l'on puisse reconstruire la génétique (théorique) des populations sous la forme d'un système axiomatique qui soit conforme aux canons de la conception classique ferait de la théorie (synthétique) de l'évolution, considérée dans son ensemble, une théorie qui serait elle-même formalisable – du moins partiellement et en puissance – à l'instar d'une telle conception des théories scientifiques³⁶⁶. Plus précisément, cette conclusion découlait d'un raisonnement qui s'articulait en trois étapes. La première de ces étapes consistait à montrer en quoi il serait effectivement possible de reconstruire la génétique (théorique) des populations sous la forme d'un système axiomatique, et notamment sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques. La deuxième consistait, justement, à étayer la thèse que « la génétique des populations est le noyau de la théorie de l'évolution [*population genetics is the core of evolutionary theory*]...[c'est-à-dire] que la génétique des populations décrit tous les mécanismes fondamentaux du changement évolutif [*population genetics describe all of the fundamental mechanisms of evolutionary change*] » (Thompson 1989, p. 53). La troisième et dernière étape consistait à affirmer que la structure et le contenu de disciplines telles que la paléontologie ou la systématique ne seraient pas, du moins en puissance, incompatibles avec une extension de ce même formalisme axiomatique – c'est-à-dire du formalisme dont on pourrait se servir pour reconstruire la génétique des populations – à l'ensemble de la théorie (synthétique) de l'évolution, contrairement à ce que suggérerait, par exemple, T. A. Goudge (1961)³⁶⁷. Cela dit, en quoi consistent, plus

³⁶⁶ Comme l'a observé, encore une fois François Duchesneau (1997), la thèse au sujet des relations entre la génétique des populations (c'est-à-dire la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution) et la théorie de l'évolution (c'est-à-dire la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie) que défendait Ruse (1973) était, en fait, double : « Ruse soutient d'une part que la génétique des populations dont la structure axiomatico-déductive ne lui semble pas faire de doute constitue le principe d'unification de la théorie de l'évolution ; d'autre part que cette dernière théorie, à travers ses multiples imperfections, tend vers une forme suffisante d'adéquation au modèle syntaxique de théorie bien formée » (Duchesneau 1997, p. 328).

³⁶⁷ Plus précisément, comme l'observait Ruse (1973) lui-même, Goudge (1961) avait donné trois raisons pour lesquelles il faudrait considérer que la théorie de l'évolution serait « une théorie d'une nature bien différente de celle des théories de la physique ou de la chimie » (« *a theory of quite a different nature from the theories of physics and chemistry* ») (Ruse 1973, p. 62), si bien qu'il serait, justement, impossible de la reconstruire sous une forme axiomatique. Premièrement, Goudge (1961) estimait que « les concepts qui apparaissent dans un système axiomatique formalisé [*a formalized axiomatic system*] ont une signification qui est absolument fixe et précise [*an absolutely fixed and precise meaning*] », alors que les concepts qui caractérisent la théorie de l'évolution ne se laisseraient pas définir d'une telle manière puisqu'ils « font référence à des faits dont la complexité est énorme » (« *refer to facts whose complexity is enormous* ») (Goudge 1961, p. 16 ; cité par Ruse 1973, p. 62). Deuxièmement, Goudge (1961) affirmait également que la théorie de l'évolution

concrètement, les arguments que Ruse (1973) présentait à l'appui d'un tel raisonnement ? En quoi nous permettraient-ils de corroborer les conclusions au sujet des propriétés fondamentales qui caractériseraient tel ou tel cadre conceptuel que nous avons tirées à partir de notre analyse de la conception classique des théories scientifiques, en les appliquant au cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution ?

Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.1), en quoi Ruse (1973) s'appuyait explicitement sur la conception classique des théories scientifiques pour en déduire des critères de scientificité. Plus précisément, nous montrerons qu'il faisait appel à quatre critères fondamentaux, à savoir la distinction entre entités observables et entités non observables, la distinction entre énoncés analytiques et énoncés synthétiques, la démarche axiomatique et le modèle nomologico-déductif de l'explication. Son but était, en effet, d'établir que la théorie (synthétique) de l'évolution serait une science « comme toutes les autres », c'est-à-dire une science que posséderait les caractéristiques qu'énoncent ces quatre critères. Pour ce faire, il souhaitait montrer que la génétique mendélienne et la génétique des populations feraient partie d'un seul et même système axiomatique, où l'on pourrait trouver des termes qui portent sur des entités observables et des termes qui portent sur des entités non-observables, des énoncés analytiques et des énoncés synthétiques. Ensuite, Ruse (1973) entendait également montrer en quoi il serait possible de fournir des explications nomologico-déductives qui soient fondées sur la génétique (mendélienne et des populations) pour tous les phénomènes qui font partie des domaines d'application de disciplines telles que la systématique, la paléontologie, etc. C'est pourquoi, dans le but d'évaluer les arguments qu'il présentait, nous analyserons la manière dont il déduisait le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) à partir des deux lois de Mendel (1866), ainsi que la façon dont il se servait d'un tel principe pour rendre compte d'un phénomène comme la radiation adaptative des pinçons de Darwin. Dans notre analyse, nous montrerons en quoi, si l'on suppose que les causes génétiques de la radiation adaptative des pinçons de Darwin soient liées à l'émergence d'un état de

ne se prêtait pas, du moins à l'époque à laquelle il écrivait, à une mise en forme axiomatique car « la rigueur et la complétude qui devraient exister avant que l'on puisse entreprendre toute tentative d'axiomatisation lui font défaut » (« *is lacking in the tidiness and completeness which should exist before any axiomatization is undertaken* ») (Goudge 1961, p. 16 ; cité par Ruse 1973, p. 62). Troisièmement, la dernière raison que donnait Goudge (1961) consistait à affirmer que « la théorie de l'évolution contient, en tant que partie essentielle de sa structure, un certain nombre de propositions historiques [*'historical statements'*] », c'est-à-dire un certain nombre de propositions qui portent sur « des phénomènes tels que les tendances phylogénétiques, la radiation adaptative, l'extinction de formes de vie plus anciennes » (« *such phenomena as phylogenetic trends, adaptive radiation, the extinction of past forms of life* »), etc. et qu'il serait donc impossible, pour cette même raison, de mettre sous la forme de « conséquences logiques d'un ensemble de postulats » (« *logical consequences of a set of postulates* ») (Goudge 1961, p. 16 ; cité par Ruse 1973, p. 62).

polymorphisme équilibré, il est effectivement possible de se servir du principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), ainsi que d'autres lois qui relèvent de la génétique des populations comme lois de couverture pour expliquer un tel phénomène, c'est-à-dire un phénomène qui relève, à priori, du domaine de la morphologie et de la systématique. Cela nous permettra d'aborder les critiques qui ont été adressées à la démarche de Ruse (1973), afin d'en évaluer les mérites et la portée. Nous nous pencherons, tout particulièrement, sur les critiques qui ont été avancées par John Beatty (1980a, 1980b, 1987) et par Paul Thompson (1989). Dans un second moment (section 2.2), nous montrerons en quoi ces critiques sont moins pertinentes qu'on ne le pourrait croire, du premier abord, car elles se concentrent sur le rôle prédominant que Ruse (1973) a attribué à la génétique des populations dans sa propre reconstruction de la structure de la théorie synthétique. La raison en est que la théorie synthétique constitue, en effet, un cadre théorique et conceptuel dans lequel les fondements génétiques des phénomènes évolutifs jouent un rôle prépondérant, comme l'on peut s'en apercevoir si l'on analyse, encore une fois, les écrits de Theodosius Dobzhansky (1951, 1970), et notamment les deux dernières éditions de *Genetics and the Origin of Species*. C'est pourquoi nous entamerons une analyse croisée des textes de Dobzhansky et des arguments de Ruse (1973) afin de montrer en quoi la conception classique des théories scientifiques pourrait constituer un cadre analytique pour la formalisation de la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel génétiquement fondé. Nous serons donc amenés à questionner la manière dont le cadre de la théorie synthétique permet de concevoir les rapports entre génotypes et phénotypes, et donc, par conséquent, les liens que l'on peut établir entre la génétique (mendélienne et des populations) et les autres branches des sciences de la vie qui s'inscrivent dans ce même cadre. Plus précisément, nous analyserons la manière dont Dobzhansky (1951, 1970) mobilisait deux concepts fondamentaux dans le but de résoudre ces mêmes problématiques, à savoir les concepts de « norme de réaction » et de « norme adaptative ». Nous avancerons, ainsi, la thèse que lorsqu'elles sont mises dans une forme plus mathématique, les normes de réaction et les normes adaptatives constituent des postulats (ou règles) de correspondance, ce qui nous permettra de formuler des arguments en faveur d'une application du modèle de la conception classique au cas spécifique de la théorie synthétique. Cela dit, dans un troisième moment (2.3), nous serons amenés à problématiser ces mêmes arguments, sur la base du constat que notre analyse des arguments de Dobzhansky (1951, 1970) nous aura finalement contraint à reconnaître la nécessité de penser la sélection naturelle en termes dynamiques. C'est pourquoi nous nous pencherons sur la question de savoir si une conception de la sélection naturelle telle que celle qu'implique l'interprétation de la théorie de l'évolution en tant que théorie des forces qu'a élaborée Elliott Sober (1984a) serait compatible avec les présupposés de la conception classique des théories scientifiques. C'est pourquoi, après avoir constaté l'insuffisance des arguments de Ruse

(1973) de ce point de vue particulier, nous nous tournerons vers une alternative naturelle à l'axiomatisation qu'a proposée ce dernier, mais qui s'inscrit tout de même dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques (quoique au sens large du terme). Il s'agit, plus précisément, de l'axiomatisation de la théorie de Darwin (1859) qu'ont proposée Mary B. Williams (1970) et Alexander Rosenberg (1985). Nous verrons, ainsi, en quoi ces deux auteurs se sont inspirés de Darwin (1859) pour donner une formulation abstraite et mathématisée du principe de sélection naturelle, qui repose sur un certain nombre de concepts et d'outils issus de la théorie des ensembles partiellement ordonnés et de la théorie des graphes. Nous analyserons cette formalisation alternative de manière détaillée, afin d'en tirer des conclusions aussi bien au sujet de la conception classique des théories scientifiques qu'au sujet de la théorie synthétique de l'évolution.

2.1 Une théorie axiomatique de l'évolution est-elle possible ? Michael Ruse et la conception classique des théories scientifiques

Dans l'introduction à son manuel, Ruse (1973) énumère ainsi les quatre caractéristiques des théories physico-chimiques qui en feraient de « véritables » théories scientifiques, tout au moins du point de vue des tenants de l'empirisme logique (Braithwaite 1953 ; Nagel 1961 ; Hempel 1966) tel qu'il l'interprétait lui-même. Plus précisément, la première des caractéristiques qu'énumérait Ruse (1973) n'est rien d'autre que le présupposé d'après lequel les théories scientifiques feraient référence à « des entités de deux types » (« *entities of two kinds* »), à savoir, d'une part, à « des entités 'théoriques', 'hypothétiques' ou 'non-observables' » (« *'theoretical', 'hypothetical' or 'non-observable' entities* ») – tels « les molécules, les électrons, les fonctions d'onde et les charges électriques » – et, d'autre part, à « des entités 'observables', 'réellement existantes' ou 'non-théoriques' » (« *'observable', 'really existent' or 'non-theoretical' entities* ») – tels les pendules, les prismes et les planètes (Ruse 1973, p. 10). La deuxième consiste en ceci que les théories scientifiques se composeraient – en tant qu'objets linguistiques – de « deux types d'énoncés » (« *two kinds of statement* »), à savoir, d'une part, d'« énoncés qui sont vrais de manière nécessaire et *a priori* » (« *a priori, necessarily true statements* ») – telles les vérités logiques et mathématiques – et, d'autre part, d'énoncés qui sont vrais de manière nécessaire, mais *a posteriori*. Il s'agirait, plus précisément, de « vérités universelles et empiriques » (« *true, universal, empirical statements* ») qui présentent une « nécessité 'nomique' » (« *'nomic' necessity* »), c'est-à-dire de « lois » (« *laws* ») scientifiques (Ruse 1973, p. 10). La troisième caractéristique correspond, en revanche, au présupposé d'après lequel les théories scientifiques consisteraient essentiellement en des « systèmes 'axiomatiques' ou 'hypothético-déductifs' » (« *'axiomatic' or 'hypothetico-deductive' systems* »), et notamment en des

systèmes d'énoncés qui portent, encore une fois, sur deux types d'entités distincts. D'une part, elles se constitueraient d'énoncés qui portent sur des entités théoriques et qu'il serait possible de déduire à partir d'un certain nombre de « prémisses » (« *premises* ») ou d'axiomes – c'est-à-dire d'un certain nombre d'énoncés dont la vérité est acceptée sans démonstration et qui ne renvoient généralement qu'à des entités théoriques –, par l'intermédiaire de règles d'inférence. D'autre part, elles comporteraient également des énoncés qui portent sur des entités non-théoriques et qu'il serait possible de dériver à partir d'énoncés de la première catégorie – à savoir à partir d'un certain nombre d'axiomes, ainsi que de leurs conséquences théoriques – au moyen de « principes 'pont' » (« *'bridge' principles* ») (Ruse 1973, p. 10-11), c'est-à-dire, comme nous l'avons déjà vu, au moyen d'énoncés mixtes dont la fonction consiste à faire le lien entre le corps conceptuel d'une théorie donnée et ses fondements empiriques. En conclusion, la dernière des quatre caractéristiques que Ruse (1973) attribuait, dans une perspective logico-empiriste, aux « véritables » théories scientifiques – et qui est étroitement liée à la précédente – consiste en ceci que les explications que l'on peut formuler au moyen de ces dernières seraient des explications d'une nature particulière, c'est-à-dire, comme nous l'avons déjà évoqué, des « explications par une loi de couverture » (« *'covering law' explanations* »). Leur fonction épistémique serait, par conséquent, de « déduire un énoncé qui porte sur la chose à expliquer à partir d'autres énoncés, dont au moins un est une loi » (« *a derivation of a statement about the thing being explained from other statements, at least one of which is a law* ») (Ruse 1973, p. 11). En conséquence, c'est précisément de cette liste de caractéristiques que nous devons partir, si nous souhaitons reconstruire les arguments par le biais desquels Ruse (1973) visait à étayer les trois étapes du raisonnement que nous avons présenté plus haut, dont la première consiste, notamment, à montrer en quoi il serait effectivement possible de reconstruire la génétique (théorique) des populations sous la forme d'« un véritable système axiomatique » (« *a genuine axiomatic system* ») (Ruse 1973, p. 32), c'est-à-dire d'un système axiomatique qui soit conforme aux canons de la conception classique des théories scientifiques.

Pour ce faire, Ruse (1973) entendait démontrer, notamment, que la génétique des populations se réduirait à un ensemble de conséquences logiques que l'on pourrait déduire de la génétique mendélienne, qui serait-elle-même axiomatisable sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques. Plus précisément, il affirmait que, lorsqu'on en considère « le simple squelette » (« *the barest skeleton* ») (Ruse 1973, p. 15), il serait possible de reconstruire la génétique mendélienne sous la forme d'une « théorie biologique de l'hérédité » (« *biological theory of heredity* ») (Ruse 1973, p. 15), et plus précisément sous la forme d'une théorie du gène, en tant

qu'« *unité héréditaire* » (« *unit of heredity* ») (Ruse 1973, p. 13)³⁶⁸, qui consisterait, essentiellement, en deux axiomes fondamentaux. Ces axiomes ne seraient, en effet, rien d'autre que les deux lois de Mendel (1866) : premièrement, ce qu'on appelle généralement la « loi de la ségrégation » (« *law of segregation* »), c'est-à-dire un principe qui affirme que, « pour tout individu sexué, chaque parent lui apporte un seul et unique gène à chaque *locus* » (« *for each sexual individual, each parent contributes one and only one of the genes at every locus* ») (Ruse 1973, p. 13) et que « la probabilité que tel ou tel gène parental soit transmis est la même que la probabilité que soit transmis l'autre gène qui occupe ce même *locus* [c'est-à-dire l'allèle que possède l'autre parent] » (« *the chance of any parental gene being transmitted is the same as the chance of the other gene at the same parental locu* ») (Ruse 1973, p. 14) ; deuxièmement, ce qu'on appelle la « loi de l'assortiment indépendant » (« *law of independent assortment* »), d'après laquelle « les gènes de chaque *locus* se répartissent [, dans la progéniture,] indépendamment des gènes qui occupent les autres *loci* » (« *genes at each locus segregate independently of genes at other loci* »), si bien que la probabilité qu'un enfant reçoive telle ou telle variante allélique de l'un de ses parents est indépendante de la probabilité qu'il reçoive également telle ou telle variante allélique d'un autre gène (Ruse 1973, p. 14). Ensuite, afin de montrer en quoi le système que constituent ces deux axiomes se conformerait au modèle incarné par la conception classique des théories scientifiques, Ruse (1973) avançait également qu'il serait possible d'y retrouver, quoiqu'au prix de quelques approximations, les différentes caractéristiques de la liste qu'il avait dressée. Plus précisément, il estimait que l'on pourrait envisager les deux lois de Mendel (1866) comme étant de véritables lois scientifiques, c'est-à-dire comme étant des énoncés universels, dépourvus de nécessité logique, mais, tout de même, doués de nécessité nomique. En tant que telles, elles porteraient donc sur des entités théoriques, hypothétiques ou non-observables (c'est-à-dire les gènes) et elles permettraient, en outre, de relier ces mêmes entités à des entités observables, réellement existantes ou non-théoriques (c'est-à-dire les caractères phénotypiques), moyennant un certain nombre de principes pont, c'est-à-dire un certain nombre de règles de coordination (pour reprendre

³⁶⁸ Ruse (1973) faisait, en effet, la distinction entre trois aspects du concept de gène : premièrement, le concept de gène en tant qu'« *unité fonctionnelle* » (« *unit of function* »), c'est-à-dire en tant que « cause ultime » (« *ultimate cause* »), quoique non pas « unique » (« *sole* »), « de tous les caractéristiques organiques héréditaires » (« *of all heritable organic characteristics* ») (Ruse 1973, p. 12-13) ; deuxièmement, justement, le concept de gène en tant qu'« *unité héréditaire* », c'est-à-dire en tant que « lien [causal] entre une génération donnée et la génération suivante » (« *link between one generation and the next* ») (Ruse 1973, p. 13) ; troisièmement, le concept de gène comme étant « *la plus petite unité de crossing-over* » (« *the smallest unit of crossing-over* »), et donc comme étant la plus petite composante chromosomique qui ne se subdivise jamais en plusieurs sous-unités lors du *crossing-over* (Ruse 1973, p. 13), c'est-à-dire lors d'une recombinaison réciproque entre deux chromosomes homologues, au cours de la méiose, qui comporte l'échange de matériel génétique entre ces derniers.

le terme que nous avons employé dans les chapitres précédents). Contrairement à ce qu'avait pu maintenir John J. C. Smart (1963), dans son ouvrage intitulé « *Philosophy and Scientific Realism* » (« *La philosophie et le réalisme scientifique* »), Ruse (1973) affirmait, ainsi, que les lois de Mendel (1866) satisferaient pleinement les conditions qui permettent d'attribuer le statut de loi à un énoncé qui a pour objet une certaine régularité naturelle. En particulier, il estimait qu'elles satisferaient l'exigence qu'il qualifiait lui-même, de manière quasiment oxymorique, de « condition limitée d'universalité sans restrictions » (« *the limited condition of unrestricted universality* ») (Ruse 1973, p. 29)³⁶⁹, car elles sont valables pour « un large spectre d'organismes » (« *a wide range of organisms* ») et même en présence de conditions qui n'avaient pas déjà été « incorporées » (« *built into* ») dans leur formulation originale (Ruse 1973, p. 29). De plus, il estimait également que les gènes seraient parfaitement comparables aux espèces d'entités dont il est question dans les principes fondamentaux des théories physico-chimiques, tels les atomes dont l'existence est postulée par les lois de la mécanique statistique : d'une part, il serait, en effet, possible de les considérer comme étant, de même que les atomes de la mécanique statistique, des entités théoriques, hypothétiques ou non-observables, quoique les trois caractéristiques en question soient difficiles à définir de manière claire et distincte³⁷⁰ ; d'autre part, néanmoins, la classification des gènes dans ces trois catégories s'avérerait ambiguë précisément pour les mêmes raisons qui pourraient nous amener à douter du statut ontologique et épistémologique des atomes, c'est-à-dire, par exemple, « les ambiguïtés qui découlent de la question de savoir quels sont exactement les instruments dont on pourra admettre l'usage, tout en continuant de qualifier l'entité en question d'« observationnelle » » (« *ambiguities stemming from*

³⁶⁹ Il s'agit, plus précisément, de l'idée d'après laquelle tel ou tel énoncé peut être considéré comme étant une loi à la condition qu'« il ne soit pas en conflit avec aucune de nos autres croyances (notamment, avec les théories que nous acceptons) [*it be found not to clash with any of our other beliefs (in particular, with theories that we accept)*], qu'il soit valable dans un large spectre de conditions différentes [*in a wide range of different conditions*'] et que, de préférence, certaines de ces mêmes conditions soient telles que, avant de concevoir une telle loi, nous n'aurions jamais cru qu'elle serait valable en leur présence [*some of these conditions will be such that we never thought of the law holding under them, before we first conceived of the law*'] » (Ruse 1973, p. 27).

³⁷⁰ « Dans l'ensemble, nous pouvons constater que l'on peut dresser plusieurs distinctions entre les entités scientifiques [*draw several distinctions between scientific entities*'] et, ce faisant, nous pouvons découvrir des choses extrêmement intéressantes à leur égard [*reveal some extremely interesting things about them*']. Néanmoins, quoique nous puissions avoir, de manière intuitive, le sentiment que les entités scientifiques sont de deux sortes différentes [*of two different sorts*'], et quoique toutes ces répartitions reflètent quelques-unes des raisons qui supportent nos intuitions, il semble clair qu'il n'existe aucune manière unique de distinguer les entités scientifiques entre elles [*there is no one absolute way to divide scientific entities*'], et que différents critères de distinction produiront, de toute probabilité, des répartitions qui seront quelque peu différentes, malgré des similitudes fondamentales [*despite fundamental similarities*'] » (Ruse 1973, p. 19-20).

just what kind of instruments one will allow and still be prepared to call an entity 'observational' ») (Ruse 1973, p. 24)³⁷¹.

Par conséquent, c'est précisément sur de telles conclusions que s'appuyait Ruse (1973) afin de démontrer non seulement que la génétique (théorique) des populations serait une extension de l'axiomatique mendélienne, mais également (dans les étapes successives d'un seul et même raisonnement) qu'elle constituerait (en tant que théorie génétique de l'évolution) le véritable noyau conceptuel de la théorie synthétique, si bien que l'on pourrait considérer que cette dernière serait elle-même (du moins partiellement et en puissance) formalisable sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques. Il en découle que la thèse qu'il visait à établir était donc double : premièrement, la thèse d'après laquelle il serait possible de rendre compte de tous les phénomènes qu'étudient des disciplines telles que la systématique, la morphologie ou la paléontologie en faisant appel, du moins en dernier recours, à des explications de nature génétique ; deuxièmement, la thèse d'après laquelle le fait que toutes les explications évolutives soient, pour ainsi dire, « génétiquement fondées » impliquerait que les quatre caractéristiques propres aux « véritables » théories scientifiques que l'on peut déduire de la conception logico-empiriste du savoir s'appliqueraient (toujours partiellement et en puissance) à l'ensemble de la théorie synthétique (c'est-à-dire non seulement à la théorie synthétique comme théorie génétique de l'évolution, mais également à la théorie synthétique comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie). Afin d'étayer cette double thèse, Ruse (1973) avait, cependant, besoin d'identifier une sorte de principe fondamental de la génétique (théorique) des populations qui soit directement dérivable des lois de Mendel (1866) et qui puisse servir de prémisse pour en déduire d'autres principes, qui aient pour objets des phénomènes non-génétiques. Un tel principe n'est rien d'autre que « la loi de Hardy-Weinberg » (« *the Hardy-Weinberg law* ») (Hardy 1908 ; Weinberg 1908 ; Ruse 1973, p. 33), que Ruse (1973) regardait, justement, comme étant une conséquence logique qui découlerait directement des lois de Mendel (1866), et dont il se servait pour en tirer deux conclusions majeures. En effet, d'une part, Ruse (1973) utilisait la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) pour en conclure, au vu de la place centrale qu'occupe un

³⁷¹ Ruse (1973) remarquait, par exemple, que si l'on étend le concept d'« observation » jusqu'à ce qu'il inclue les observations que l'on peut effectuer au moyen d'un microscope, et notamment d'un microscope électrique, il est possible d'affirmer que les gènes sont des entités, directement ou indirectement, observables, aussi bien en tant qu'unités de *crossing-over* (et, plus généralement, en tant qu'unités structurelles de molécules d'ADN) que comme unités fonctionnelles et héréditaires. Il en concluait, néanmoins, que de telles observations seraient « de nature extrêmement technique » (« *of an extremely technical kind* »), de même que celles qui sont nécessaires pour « observer » les atomes dont se constitue un gaz dont le comportement obéit aux lois de la mécanique statistique, si bien que l'on pourrait tout de même considérer que « le gène est, dans une large mesure, une entité observable » (« *the gene is to a large extent an observable entity* ») (Ruse 1973, p. 21).

tel principe au sein de la génétique (théorique) des populations – comme nous l’avons vu dans le chapitre précédent –, que cette dernière constituerait, justement, un système d’énoncés que l’on pourrait axiomatiser, sur la base des principes de la génétique mendélienne et des canons de la conception classique des théories scientifiques. D’autre part, il se servait de cette même loi, en tant que principe permettant d’identifier et de quantifier les effets des différents facteurs évolutifs qui forment les principaux *explanantia* que l’on peut formuler au sein du cadre de la théorie synthétique, pour en conclure également qu’il serait toujours possible de ramener tel ou tel phénomène évolutif, dans la mesure où on peut l’envisager comme étant un produit de ces mêmes facteurs, aux modèles de la génétique (théorique) des populations. Cela dit, pour quelles raisons Ruse (1973) considérait-il non seulement que le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) se laisserait déduire des lois de Mendel (1866), mais également que l’on pourrait s’en servir pour rendre compte de phénomènes qui font l’objet d’autres branches des sciences de la vie que la génétique (théorique) des populations ?

Afin de répondre à une telle question, nous verrons, dans un premier temps (2.1.1), en quoi il est possible de déduire la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) à partir des deux lois de Mendel (1866) et moyennant quelques hypothèses auxiliaires au sujet de la composition de la population en question et sur les facteurs évolutifs qui y agissent. Cela nous amènera à nous poser la question de savoir en quoi l’on pourrait se servir d’un tel principe comme loi de couverture pour rendre compte, dans une perspective évolutionniste, de phénomènes qui constituent l’objet d’étude d’autres branches des sciences de la vie que la génétique. Tout particulièrement, nous prendrons en considération un problème, issu de la systématique, qui consiste à rendre compte de l’émergence, par radiation adaptative, des différentes espèces de « pinsons de Darwin » (« *Darwin’s finches* »), c’est-à-dire d’un genre d’oiseaux qui a joué un rôle essentiel dans le développement de la théorie de Darwin (1845, 1859). Un tel phénomène soulève, en effet, un problème central dans la biologie de l’évolution, à savoir celui de la spéciation, et donc des mécanismes qui font en sorte que deux populations cessent de se croiser entre elles et finissent par diverger évolutivement, au fil des générations. Suivant Ruse (1973), nous pouvons essayer de rendre compte de la radiation adaptative des pinsons de Darwin par l’intermédiaire de l’effet du fondateur, c’est-à-dire d’un phénomène que l’on peut expliquer, à son tour, en le ramenant au principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908). Faire cela signifie, cependant, s’interroger sur les possibles causes génétiques de l’effet du fondateur, ainsi que sur la manière dont ces mêmes causes peuvent manifester leurs effets au niveau phénotypique. C’est pourquoi nous prendrons en considération l’une de ces possibles causes génétiques, c’est-à-dire l’existence, dans la population en question, d’un réservoir de diversité génétique qui serait, pour ainsi dire, « caché » par les effets de dominance qui sont dus à la persistance de génotypes hétérozygotes,

et plus précisément à un état de « polymorphisme équilibré » (« *balanced polymorphism* ») (Ruse 1973). Afin de montrer en quoi la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) permet de rendre compte des conditions qui sont nécessaires pour que le *pool* génétique de la population en question atteigne un tel état d'équilibre, nous analyserons le cas – bien connu – de la conservation de la variante allélique d'un gène codant pour l'hémoglobine qui est associée aussi bien à la drépanocytose qu'à une résistance accrue aux infections palustres (Allison 1954). Cela nous aidera donc à montrer en quoi le problème que pose un tel phénomène consiste en ceci qu'il nous amène à identifier une possible relation entre la persistance des génotypes hétérozygotes et une quelque forme d'avantage sélectif. C'est ainsi que, dans un second temps (2.1.2), nous verrons en quoi la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) permet de formuler des prédictions mathématiques au sujet de l'évolution de la composition du *pool* génétique de la population en question – c'est-à-dire au sujet de la variation des fréquences des génotypes (ou des gènes) dont il se compose – sous l'hypothèse que l'une des conditions antécédentes que présuppose cette même loi ait été violée. Dans le cas du polymorphisme équilibré, il s'agit du présupposé de l'absence de toute pression de sélection. Nous montrerons, par conséquent, en quoi la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) permet, en tant que « modèle nul » (« *null model* ») (Herron & Freeman 2014) de la génétique des populations, de quantifier les effets qu'une certaine pression de sélection produit sur le *pool* génétique d'une population donnée, et notamment les effets que produit cette forme particulière de pression de sélection qui est associée au phénomène du polymorphisme équilibré. Ce faisant, nous parviendrons à déduire, en tant qu'*explanans*, une description de ce même *pool* génétique, en état de polymorphisme équilibré, à partir du principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908). Cela nous permettra, par conséquent, de démontrer qu'un tel principe constitue effectivement une possible loi de couverture, que l'on peut appliquer à des phénomènes qui relèvent de l'évolution phénotypique au moyen d'un certain nombre de principes pont, et donc d'étayer les thèses de Ruse (1973), du moins à ce stade de notre réflexion. Ces dernières ont, en effet, fait l'objet d'un certain nombre de critiques, telles que celles qui ont été soulevées par John Beatty (1980a, 1980b, 1987) et par Paul Thompson (1989). Cela dit, en quoi ces mêmes critiques seraient-elles pertinentes pour évaluer l'axiomatisation de Ruse (1973) en tant que projet de formalisation de la théorie synthétique de l'évolution ?

2.1.1 Qu'explique vraiment la génétique des populations ?

Comme nous l'avons rappelé plus haut, Ruse (1973) considérait que la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) constituerait la clé de voute d'une possible formalisation de la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, sur le fondement de la génétique (théorique) des populations – et donc d'une théorie génétique de l'évolution –, ainsi que sur le modèle de la conception classique des théories scientifiques. Plus précisément, il estimait qu'il s'agirait d'une conséquence logique des lois de Mendel (1866) dont il serait, en outre, possible de se servir comme loi de couverture pour expliquer un certain nombre de phénomènes évolutifs, en conformité avec le modèle nomologico-déductif de l'explication (Hempel & Oppenheim 1948 ; Hempel 1965 ; Woodward 2003 ; Kaiser 2014). La loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) affirme, en effet, que si l'on considère un *locus* (biallélique) qui peut être occupé par deux allèles alternatifs, A_1 et A_2 , il est possible de prédire que, étant données certaines « conditions antécédentes » (« *antecedent conditions* ») (Ruse 1973, p. 34) et après une génération de croisements entre les N individus diploïdes qui sont porteurs du gène en question, les fréquences des génotypes A_1A_1 , A_1A_2 et A_2A_2 attendront un état d'équilibre que l'on peut caractériser comme suit :

$$p^2 A_1A_1 : 2pq A_1A_2 : q^2 A_2A_2$$

où p est la fréquence génique de l'allèle A_1 et $q = (1 - p)$ est la fréquence génique de l'allèle A_2 (Ruse 1973, p. 33). Plus précisément, les conditions antécédentes dont il faut postuler l'existence sont les suivantes : absence de pression de sélection (« tous les membres de notre population modèle [*all members of our model population*'] ont survécu à des taux égaux et ont légué un nombre égal de gamètes au *pool* génétique [*contributed an equal number of gametes to the gene pool*'] ») ; absence de pression de mutation (« dans la population modèle, aucune copie de l'un parmi les allèles déjà existants [*existing alleles*'] n'a été transformée, par mutation, dans la copie d'un autre allèle déjà existant et aucun nouvel allèle n'a été créé [*no new alleles were created*'] ») ; absence de migration (« aucun individu n'est entré dans la population ou en est sorti ») ; « absence d'événements aléatoires qui fassent en sorte que les individus qui sont porteurs de certains génotypes lèguent à la génération suivante plus d'allèles que d'autres individus » (« *there are no chance events that cause individuals with some genotypes to pass more of their alleles to the next generation than others* ») ; absence d'« appariement assortatif » (« *assortative mating* »), ce qui signifie que « les individus choisissent leurs partenaires de manière aléatoire » (« *individuals choose their mates at random* »), si bien qu'ils

ont la même probabilité de se reproduire avec tel ou tel autre individu, indépendamment des caractéristiques phénotypiques de ces derniers (Herron & Freeman 2014, p. 189-190).

C'est ainsi que, afin de montrer en quoi une telle loi découle directement des principes de la génétique mendélienne, il suffit de dériver ce vecteur de fréquences génétiques à partir des conditions antécédentes dont nous venons de parler, ainsi que des lois de Mendel (1866) elles-mêmes, ce que Ruse (1973) a proposé de faire comme suit. Considérons, encore une fois, un *locus* biallélique et supposons que « la distribution initiale des gènes parmi les organismes » (« *the distribution of genes amongst the organisms* ») soit

$$P A_1A_1 : H A_1A_2 : Q A_2A_2$$

où $P + H + Q = 1$, alors que les fréquences génétiques des allèles A_1 et A_2 sont, encore une fois, p et q (Ruse 1973, p. 34). Il s'ensuit que, à la première génération, chaque croisement entre deux organismes de sexe opposé donnera lieu à 3^2 combinaisons génétiques possibles, dont chacune sera affectée d'une valeur de probabilité que l'on pourra exprimer en fonction de P , H ou Q :

Croisements		A_1A_1	A_1A_2	A_2A_2
	Probabilités	P	H	Q
A_1A_1	P	P^2	PH	PQ
A_1A_2	H	HP	H^2	HQ
A_2A_2	Q	QP	QH	Q^2

(Ruse 1973, p. 34). De surcroît, nous pouvons déduire de la « première loi de Mendel » (« *Mendel's first law* ») – c'est-à-dire de la loi de la « ségrégation égale » (« *equal segregation* »), ou « indépendante », des allèles – (Griffiths *et al.* 2015, p. 37) que la progéniture de cette première génération se répartira, selon les différents types de croisements, de la manière suivante :

$A_1A_1 \times A_1A_1$	A_1A_1
$A_1A_1 \times A_1A_2$	$\left(\frac{1}{2}\right)(A_1A_1) + \left(\frac{1}{2}\right)(A_1A_2)$
$A_1A_1 \times A_2A_2$	A_1A_2
$A_1A_2 \times A_1A_2$	$\left(\frac{1}{4}\right)(A_1A_1) + \left(\frac{1}{2}\right)(A_1A_2) + \left(\frac{1}{4}\right)(A_2A_2)$

$A_1A_2 \times A_2A_2$	$\left(\frac{1}{2}\right)(A_1A_2) + \left(\frac{1}{2}\right)(A_2A_2)$
$A_2A_2 \times A_2A_2$	A_2A_2

Nous pouvons donc en conclure que, après une première génération de croisements, la distribution des fréquences génotypiques dans la population en question sera la suivante :

Croisements		Fréquences génotypiques dans la progéniture		
Type	Fréquence	A_1A_1	A_1A_2	A_2A_2
$A_1A_1 \times A_1A_1$	P^2	P^2		
$A_1A_1 \times A_1A_2$	$2PH$	$\left(\frac{1}{2}\right)(2PH)$	$\left(\frac{1}{2}\right)(2PH)$	
$A_1A_1 \times A_2A_2$	$2PQ$		$2PQ$	
$A_1A_2 \times A_1A_2$	H^2	$\left(\frac{1}{4}\right)(H^2)$	$\left(\frac{1}{2}\right)(H^2)$	$\left(\frac{1}{4}\right)(H^2)$
$A_1A_2 \times A_2A_2$	$2HQ$		$\left(\frac{1}{2}\right)(2HQ)$	$\left(\frac{1}{2}\right)(2HQ)$
$A_2A_2 \times A_2A_2$	Q^2			Q^2

si bien que nous pouvons décrire le *pool* génétique qui résultera de ces mêmes croisements au moyen du vecteur de fréquences génotypiques

$$\left(P^2 + PH + \frac{H^2}{4}\right) A_1A_1 : (PH + 2PQ) + \left(\frac{H^2}{2} + HQ\right) A_1A_2 : \left(\frac{H^2}{4} + HQ + Q^2\right) A_2A_2$$

$$\left(P + \frac{H}{2}\right)^2 A_1A_1 : 2\left(P + \frac{H}{2}\right)\left(Q + \frac{H}{2}\right) A_1A_2 : \left(Q + \frac{H}{2}\right)^2 A_2A_2$$

(Ruse 1973, p. 35). Un tel vecteur de fréquences génotypiques nous permet d'en déduire, en outre, les fréquences géniques dont seront affectés les allèles A_1 et A_2 , toujours dans la population en question, après la première génération de croisements. Pour ce faire, il nous suffit de remarquer que, comme nous sommes en train de considérer une population diploïde, un échantillon de N individus appartenant à cette dernière contiendra $2N$ copies du gène en question et que les individus qui sont homozygotes pour tel ou tel allèle seront porteurs de deux copies de ce dernier, alors que les individus hétérozygotes seront porteurs d'une copie de chaque allèle. Il s'ensuit que, après une génération de croisements,

$$p = \frac{2\left(P + \frac{H}{2}\right)^2 N + 2\left(P + \frac{H}{2}\right)\left(\frac{H}{2} + Q\right)N}{2N} = \left(P + \frac{H}{2}\right)^2 + \left(P + \frac{H}{2}\right)\left(\frac{H}{2} + Q\right)$$

$$= \left(P + \frac{H}{2}\right)\left(P + \frac{H}{2} + \frac{H}{2} + Q\right) = \left(P + \frac{H}{2}\right)(P + H + Q) = \left(P + \frac{H}{2}\right)$$

$$q = \frac{2\left(Q + \frac{H}{2}\right)^2 N + 2\left(P + \frac{H}{2}\right)\left(\frac{H}{2} + Q\right)N}{2N} = \left(Q + \frac{H}{2}\right)^2 + \left(P + \frac{H}{2}\right)\left(\frac{H}{2} + Q\right)$$

$$= \left(Q + \frac{H}{2}\right)\left(Q + \frac{H}{2} + P + \frac{H}{2}\right) = \left(Q + \frac{H}{2}\right)(P + H + Q) = \left(Q + \frac{H}{2}\right)$$

ce qui implique que la distribution des gènes parmi la progéniture de la première génération sera exactement celle que prévoit la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), c'est-à-dire

$$p^2 A_1A_1 : 2pq A_1A_2 : q^2 A_2A_2$$

(Ruse 1973, p. 35)³⁷². Ainsi, c'est précisément pour une telle raison que l'on peut affirmer que la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) se laisse déduire de la première loi de Mendel

³⁷² Comme l'observait, encore une fois, Ruse (1973), nous pouvons montrer que les fréquences génotypiques ainsi obtenues ne sont pas seulement les mêmes que celles que l'on peut dériver de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), mais sont également des valeurs d'équilibre. En effet, si nous répétons les mêmes calculs que nous avons effectués pour la première génération de croisements afin de déterminer les fréquences dont seront affectés, respectivement, les allèles A_1 et A_2 à la suite des croisements qui auront lieu à la génération successive, à savoir p_1 et q_1 , nous pouvons en conclure que

$$p_1 = p^2 + \frac{1}{2}(2pq) = p^2 + pq = p(p + q) = p$$

$$q_1 = q^2 + \frac{1}{2}(2pq) = q^2 + pq = q(q + p) = q$$

si bien que

$$p_1^2 A_1A_1 : 2p_1q_1 A_1A_2 : q_1^2 A_2A_2 = p^2 A_1A_1 : 2pq A_1A_2 : q^2 A_2A_2$$

Cela prouve que la distribution de fréquences génotypiques que nous avons déduite de la première loi de Mendel (1866), en suivant le raisonnement de Ruse (1973), est bien une distribution d'équilibre.

(1866), en conjonction avec un certain nombre de conditions initiales. Cela dit, en quoi pourrait-on également affirmer qu'il serait possible d'utiliser la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) comme loi de couverture pour rendre compte de phénomènes qui relèvent d'autre branche des sciences de la vie que la génétique (théorique) des populations ?

Afin de répondre à cette autre question, nous pouvons considérer un exemple qui relève de la systématique – en tant qu'« étude de la nature et de la distribution des groupes d'animaux et des groupes de plantes » (« *study of the nature and the distribution of animal and plant groups* ») (Ruse 1973, p. 52) – et qui est paradigmatique du type de phénomènes biologiques dont permet de rendre compte le cadre conceptuel de la théorie synthétique de l'évolution, c'est-à-dire la diversité morphologique que l'on peut observer parmi les différentes espèces de « pinsons de Darwin », ou *Geospiza*, qui habitent les îles de l'archipel des Galapagos (Lack 1945, 1947 ; Grant 1986 ; Grant & Grant 2014). Il s'agit, en effet, d'un genre d'oiseaux qui appartiennent à la famille des pinsons (*Fringillidae*) et qui ont joué un rôle fondamental dans l'élaboration de la théorie de Darwin (1845, 1859). Ce dernier fut le premier à les décrire – dans les pages du compte rendu de son voyage au bord du *Beagle* – et à observer qu'ils varient largement par la taille de leur bec, ainsi que, plus

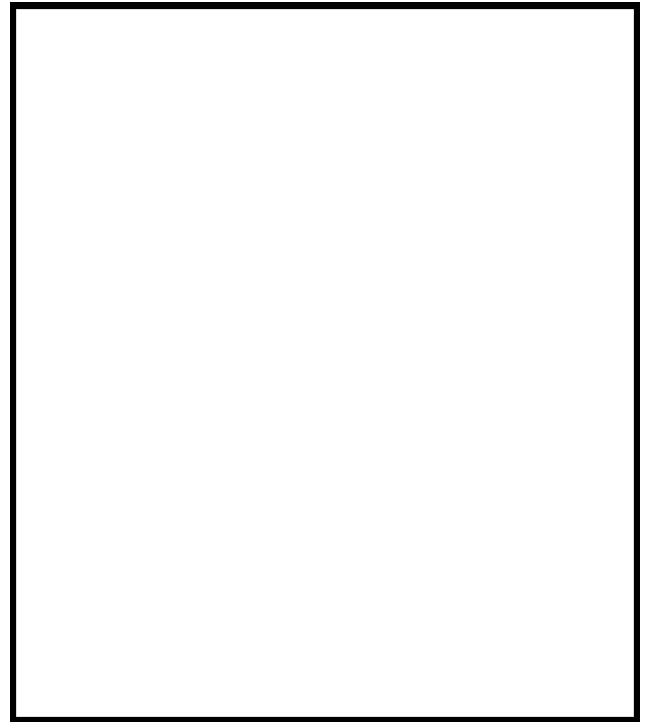


Figure 18 : Branche de l'arbre phylogénétique de la famille des *Fringillidae* (Futuyma & Kirkpatrick, p. 29)

généralement, par leurs dimensions, bien qu'ils soient étroitement apparentées entre elles – comme le montre la branche d'arbre phylogénétique qui est représentée à la figure (18), issue de Futuyma et Kirkpatrick (2017) – et qu'ils ressemblent à d'autres genres d'oiseaux qui ne se trouvent, cependant, que sur le continent américain³⁷³. Ce fut donc là l'une des raisons qui amenèrent Darwin (1859) à

³⁷³ « Le fait le plus curieux est la parfaite gradation de la grosseur des becs [*'the perfect gradation in the size of the beaks'*] chez les différentes espèces de *Geospiza* ; cette grosseur varie depuis celle du bec d'un gros-bec jusqu'à celle du bec d'un pinson... Quand on considère cette gradation et cette diversité de conformation [*'gradation and diversity of structure'*] dans un petit groupe d'oiseaux très voisins les uns des autres [*'intimately related'*], on pourrait réellement se figurer qu'en vertu d'une pauvreté originelle d'oiseaux dans cet archipel, une seule espèce s'est modifiée pour atteindre des buts différents [*'modified for different ends'*]. On pourrait s'imaginer aussi de la même façon qu'un oiseau originellement

récuser définitivement l'hypothèse d'une création séparée de types organiques immuables et à formuler celle d'une descendance commune, avec modifications toujours plus fines, non seulement des espèces d'oiseaux qu'il avait pu observer aux îles Galapagos, en particulier, mais également de toutes les espèces vivantes, en général. Comme nous pouvons en conclure sur la base de ce qu'écrit Darwin (1859) lui-même dans l'introduction à la première édition de *l'Origine des espèces*³⁷⁴, le problème auquel se trouvait confronté ce dernier était, en effet, double. Dans le cas particulier des pinsons des îles Galapagos, il s'agissait d'identifier les raisons pour lesquelles – ainsi que les manières dont – un processus de descendance avec modification à partir de progéniteurs communs, venus du continent américain, avait pu aboutir à une telle diversité. Dans le cas plus général de la diversité qui caractérise la totalité des espèces vivantes, il s'agissait de rendre compte des différentes causes de la spéciation, c'est-à-dire du « processus évolutif » (« *evolutionary process* ») qui se produit lorsqu'« une espèce se subdivise en deux populations ou en deux ensembles de populations qui ne peuvent plus se croiser [*'noninterbreeding populations'*] » (Grant & Grant 2014, p. 9), ainsi que des différentes formes que peut prendre ce même processus. En d'autres termes, de telles observations ont amené Darwin (1859), ainsi que tous les biologistes qui ont travaillé dans son sillage, à soulever les questions suivantes : « Quels sont les principaux facteurs qui causent la divergence des populations [*'cause populations to diverge'*], comment opèrent-ils et dans quelles circonstances ? Qu'est-ce qui empêche les membres de telles populations de s'entrecroiser et de se fusionner dans une seule et même population [*'interbreeding and fusing into one population'*] ? » (Grant & Grant 2014, p. 9). Si nous suivons les suggestions de Ruse (1973), nous pouvons avancer que de telles questions constituent autant de problèmes qui sont résolubles dans le contexte de la théorie synthétique lorsqu'on envisage cette dernière comme étant un cadre conceptuel pour les sciences de la vie qui est fondé sur une théorie génétique de l'évolution. En effet, c'est précisément au sein d'un tel cadre conceptuel qu'il est possible d'envisager la diversification évolutive des espèces de *Geospiza* comme étant un phénomène de « radiation adaptative » (« *adaptive radiation* ») (Futuyma &

voisin des buses en est arrivé à remplir le rôle que jouent les *Polyborus* [des oiseaux de la famille des faucons] sur le continent américain » (Darwin 1845 ; 2003, p. 406-407).

³⁷⁴ Je ne puis douter, après l'étude la plus réfléchie et le jugement le plus dépassionné dont je sois capable, que la vue soutenue par la plupart des naturalistes, et que j'ai moi-même soutenue par le passé – à savoir : que chaque espèce a été créée indépendamment [*'that each species has been independently created'*] –, est erronée. Je suis entièrement convaincu que les espèces ne sont pas immuables [*'species are not immutable'*] ; mais que celles qui appartiennent à ce qu'on appelle les mêmes genres [*'the same genera'*] sont les descendantes linéaires d'une autre espèce généralement éteinte [*'lineal descendants of some other and generally extinct species'*], de la même manière que les variétés reconnues [*'acknowledged varieties'*] d'une espèce quelconque sont les descendantes de cette espèce [*'the descendants of that species'*] » (Darwin 1859 ; 2013, p. 33).

Kirkpatrick 2017, p. 50), c'est-à-dire comme étant un phénomène consistant dans l'« évolution divergente d'un grand nombre de lignées apparentées [*'divergent evolution of numerous related lineages'*] dans un intervalle de temps relativement court... et en raison de leurs différentes formes de vie [*'for different ways of life'*] » (Futuyma & Kirkpatrick 2017, p. 50). De surcroît, c'est toujours dans le contexte de ce même cadre qu'il est possible de formuler l'hypothèse de la radiation adaptative des pinçons de Darwin s'expliquerait par ce que l'on appelle communément le « principe du fondateur », ou l'« effet du fondateur » (« *founder principle* », « *founder effect* ») (Mayr 1963, p. 211), c'est-à-dire par un phénomène qui consiste dans la « la constitution d'une nouvelle population par un petit nombre de fondateurs originaires... qui n'emportent avec eux qu'une petite fraction de la variation génétique totale de la population mère » (« *the establishment of a new population by a few original founders... which carry only a small fraction of the total genetic variation of the parental population* ») (Mayr 1963, p. 211), et que Ruse (1973) considérait comme étant, à son tour, une conséquence logique que l'on pourrait dériver, justement, de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), moyennant des principes pont qui mettent en corrélation tel ou tel ensemble de génotypes avec un certain ensemble de phénotypes. Néanmoins, en quoi pourrait-on affirmer qu'il serait possible d'utiliser la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) comme loi de couverture pour rendre compte de l'effet du fondateur ?

Pour répondre à une telle question, nous pouvons observer que Ruse (1973) considérait que la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) montrerait en quoi, « étant données certaines forces sélectives (constantes) [*'given certain (constant) selective forces'*], des individus qui sont porteurs de génotypes qui sont différents (et en compétition entre eux) [*'carriers of different (competing) genotypes'*] peuvent coexister indéfiniment dans une seule et même population », comme en témoignerait, par exemple, « le cas du polymorphisme équilibré » (« *the case of balanced polymorphism* ») (Ruse 1973, p. 57). En cas de polymorphisme équilibré, il est, en effet, possible de se servir de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) pour rendre compte du fait que « malgré une similarité génétique plutôt fondamentale [*'a pretty fundamental genetic similarity'*] entre les membres [d'un groupe de fondateurs], il existe tout de même une grande latitude pour que ces derniers se diversifient [*'considerable latitude for difference still exists'*] » (Ruse 1973, p. 57). Mais en quoi consiste, par conséquent, cet autre phénomène et en quoi serait-il possible d'en rendre compte par le biais de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) ? Le terme « polymorphisme équilibré » désigne, plus exactement, « la présence et la persistance d'une pluralité de formes morphologiques (phénotypiques) dans une seule et même population » (« *the occurrence and persistence of several morphological (phenotypic) forms in the same population* ») (Ruse 1973, p. 44). D'un point de vue génétique, ce phénomène peut être considéré comme étant la manifestation

(au niveau phénotypique) du fait que le *pool* génétique de la population en question ait atteint une situation d'équilibre qui possède deux caractéristiques principales : premièrement, toutes les variantes alléliques du gène, ou des gènes, que l'on peut associer au caractère que l'on est en train de considérer ont une fréquence d'équilibre, \hat{f} , non-nulle ; deuxièmement, il s'agit d'un état d'équilibre stable, puisque « toute perturbation, aussi faible soit-elle, de la valeur de $[\hat{f}]$ finira par entraîner un retour à cette même valeur » (« *slight perturbations from the value of $[\hat{f}]$ will result in a return to $[\hat{f}]$* ») (Griffiths *et al.* 2000). Mais en quoi consistent, par conséquent, les conditions qui sont nécessaires pour qu'une population donnée atteigne un tel état d'équilibre ? La loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) nous permet, justement, d'apporter une réponse à cette question, dans la mesure où elle nous permet, comme première chose, de formuler une « hypothèse nulle » (« *null hypothesis* ») au sujet de la dynamique de variation des fréquences génotypiques, ou alléliques, que nous observons dans telle ou telle population. Autrement dit, la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) nous donne les moyens de prédire les résultats auxquels aboutira une telle dynamique dans l'hypothèse où les conditions qu'elle présuppose elle-même, en tant que représentation de la composition du *pool* génétique d'une population idéalisée – ou « population modèle » (« *model population* ») (Herron & Freeman 2014, p. 189) –, se réalisent. C'est précisément dans ce sens qu'elle constitue le « modèle nul » – c'est-à-dire « l'ensemble de présupposés simples et explicites [*the set of simple and explicit assumptions*'] qui permet à tel ou tel chercheur de formuler une hypothèse nulle » (Herron & Freeman 2014, p. 819) – de la génétique (théorique) des populations. Il en découle que l'une des premières tâches auxquelles s'attellent les généticiens (théoriques) des populations consiste à évaluer la mesure dans laquelle les fréquences génotypiques qu'ils observent dans telle ou telle population s'écartent des fréquences d'équilibre que l'on peut déduire de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908). Pour ce faire, ils utilisent, par exemple, « le test du χ^2 » (« *chi-square test* ») (Herron & Freeman 2014 ; Griffiths *et al.* 2015), originellement proposé par Karl Pearson (1900) en tant que « critère de probabilité pour toute théorie d'un système d'erreurs observé » (« *criterion of probability on any theory of an observed system of errors* ») dont on puisse se servir afin d'ajuster les données observées aux valeurs attendues « dans le cas des courbes de fréquence » (« *in the case of frequency curves* ») (Pearson 1900, p. 157). Plus précisément, étant donné un échantillon aléatoire de n individus issus d'une population dont les membres se répartissent en m classes mutuellement exclusives (telles que, justement, les trois classes que forment les génotypes diploïdes A_1A_1 , A_1A_2 et A_2A_2), ce test permet d'évaluer la probabilité que les écarts entre les fréquences de ces différentes classes que l'on observe dans l'échantillon en question et leurs fréquences attendues, sur la base de la distribution que l'on peut déduire de l'hypothèse nulle que l'on souhaite tester (dans le cas de la loi de Hardy-Weinberg, il s'agit donc de la distribution de fréquences

génomiques ($p^2 A_1A_1: 2pq A_1A_2: q^2 A_2A_2$), soient dus à des erreurs de mesure ou d'échantillonnage. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer la valeur d'une certaine quantité, χ^2 , qui serve de « statistique de test » (« *test statistic* ») (Herron & Freeman 2014, p. 199)³⁷⁵ – c'est-à-dire qui prenne la forme d'une fonction des observations résumant l'information disponible au sujet de l'échantillon tiré – et qui soit telle que, si sa valeur s'avère inférieure à une certaine « valeur critique » (« *critical value* ») (Herron & Freeman 2014, p. 199) – déterminée en fonction de la distribution de probabilités des différentes valeurs de χ^2 dans telle ou telle condition³⁷⁶ –, il soit possible d'en

³⁷⁵ Plus précisément, la statistique de test χ^2 se définit au moyen de l'identité

$$\chi^2 \equiv \sum_{k=1}^m \frac{(n_k - np_k)^2}{np_k} = n \sum_{k=1}^m \frac{(f_k - p_k)^2}{p_k}$$

(Jaynes 2003, p. 299), où f_k représente la fréquence de la k -ième classe dans l'échantillon en question et p_k la probabilité d'appartenir à cette même classe, c'est-à-dire sa fréquence attendue, telle qu'on peut la calculer à partir de l'hypothèse nulle qui est mise à l'épreuve. Elle représente un critère de probabilité pour évaluer « la qualité de l'ajustement » (« *the goodness of fit* ») (Jaynes 2003, p. 299) des données observées aux valeurs attendues dans la mesure où elle possède les « propriétés qualitatives » (« *qualitative properties* ») suivantes : « $\chi^2 \geq 0$ et elle est égale à zéro si et seulement si les fréquences observées s'accordent exactement avec celles auxquelles on peut s'attendre si l'hypothèse [nulle] est vraie [*if and only if the observed frequencies agree exactly with those expected if the hypothesis is true*'] ». Par conséquent, des valeurs plus grandes de χ^2 correspondent à un plus grand écart entre la prédiction et l'observation, et une valeur trop grande de χ^2 devrait nous amener à douter de la véracité de l'hypothèse [nulle] [*larger values of χ^2 correspond to greater deviation between prediction and observation, and too large a value of χ^2 should lead us to doubt the truth of the hypothesis*'] » (Jaynes 2003, p. 299).

³⁷⁶ Les formes que prennent les différentes distributions de probabilité des valeurs de χ^2 dépendent, en effet, des « degrés de liberté » (« *degrees of freedom* ») que l'on peut attribuer à cette statistique de test particulière (Herron & Freeman 2014, p. 199). Dans le cas de χ^2 , ses degrés de liberté se calculent en faisant la différence entre le « nombre des classes » (« *number of classes* ») dans lesquelles se répartissent les données observées et « le nombre de valeurs indépendantes qui ont été calculées sur la base de [ces mêmes] données afin de déterminer les valeurs attendues » (« *number of independent values calculated from the data for use in determining the expected values* ») (Herron & Freeman 2014, p. 199). En ce qui concerne la distribution de fréquences génomiques que l'on peut déduire de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) pour telle ou telle population, les classes dans lesquelles se répartissent les données observées sont trois, à savoir les différents génotypes possibles, alors que les valeurs indépendantes que l'on a dû calculer afin de dériver une telle distribution des fréquences attendues sont deux, à savoir le nombre total des effectifs de la population considérée, N , et la fréquence relative de l'allèle A_1 , p , (puisque la fréquence de l'autre allèle, q , dépend de p , en ceci que $q = (1 - p)$), si bien que, pour cette hypothèse nulle particulière, le nombre de degrés de liberté de la statistique de test χ^2 est égal à 1 (Herron & Freeman 2014, p. 199). Si nous considérons la distribution des valeurs de χ^2 avec un seul degré de liberté, nous pouvons donc en conclure que, étant donné $P = 0,05$, la valeur critique de χ^2 pour la distribution de fréquences génomiques qu'implique la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) est 3,841 (Herron & Freeman 2014,

conclure que les écarts entre les fréquences observées et les fréquences attendues ne sont pas statistiquement significatifs. Dans le cas contraire, c'est-à-dire dans le cas où la valeur de χ^2 est supérieure à une telle valeur critique, il faudra considérer, en revanche, que les deux distributions de fréquences ne coïncident pas et que l'hypothèse nulle que l'on vient de tester a donc été falsifiée. Dans le cas de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), la falsification de l'hypothèse nulle implique que l'un ou que plusieurs parmi les présupposés sur lesquels repose une telle loi ne s'appliquent pas à la population en question. Cela dit, les cas échéant, comment peut-on identifier quels sont les présupposés de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) qui ont été violés ?

C'est précisément face à une question très proche qu'avait fini par se retrouver A. C. Allison (1954), après qu'il avait entrepris, en 1949, une étude de terrain qui portait sur les différents « groupes sanguins des tribus kenyanes » (« *blood types among Kenyan tribes* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 767). Au cours de cette étude, il avait, en effet, constaté que l'« hémoglobine S, ou *HbS* » (« *Hemoglobin S, or HbS* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 767) – c'est-à-dire la variante de l'hémoglobine adulte normale (hémoglobine A, ou *HbA*), qui est associée à la drépanocytose, ou anémie falciforme, et donc à la présence d'érythrocytes qui tendent à prendre une forme en faucille, comme on peut le voir dans l'image à la figure (19), issue de Griffiths *et al.* (2015) – était distribuée d'une manière tout à fait particulière dans les populations qu'il avait pu observer :

Dans les tribus vivant dans les zones arides du centre du Kenya ou dans les hauts-plateaux [*'In tribes living in arid central Kenya or in the highlands'*], la fréquence de la variante *HbS* [*'the frequency of HbS'*] était inférieure à 1% ; cependant, dans les tribus vivant sur la côte ou près du lac Victoria [*'in tribes living on the coast or near Lake Victoria'*], la fréquence de la variante *HbS* dépassait souvent 10 % et approchait 40 % dans certains endroits (Griffiths *et al.* 2015, p. 767)

Le problème que posaient les données qu'avait recueillies Allison (1954) était donc double, puisqu'il s'agissait, d'une part, de rendre compte des raisons pour lesquelles une variante de l'hémoglobine qui était associée à une maladie létale comme la drépanocytose avait pu se transmettre jusqu'à atteindre des niveaux de diffusion aussi élevés dans certaines zones du Kenya ainsi que, d'autre part,

p. 199). Cela signifie que, si l'hypothèse nulle est vraie, la probabilité que $\chi^2 \geq 3,841$ est de 5% (Herron & Freeman 2014, p. 199), alors que celle que $\chi^2 < 3,841$ est de 95%. Il en découle que toute valeur de χ^2 supérieure à ce seuil critique sera la preuve du fait que les données considérées falsifient l'hypothèse nulle en question, et donc qu'il existe des différences statistiquement significatives entre les fréquences génotypiques observées et les fréquences attendues que l'on peut calculer sur la base de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908).

d'expliquer la distribution géographique des fréquences observées du trait de caractère « *HbS* ». Ces problèmes se laissent traduire en termes génétiques de manière relativement simple, car, à l'époque où écrivait Allison (1954), il était déjà « universellement admis que l'anomalie drépanocytaire est causée par un seul et même gène mutant...[(Pauling *et al.* 1949 ; Perutz & Mitchison 1950)] » (« *universally accepted that the sickle-cell anomaly is caused by a single mutant gene* ») (Allison 1954, p.

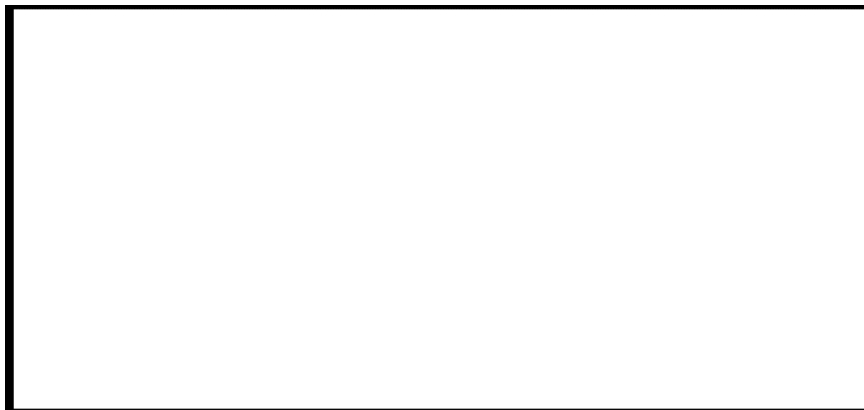


Figure 19 : « Micrographie électronique colorée montrant des drépanocytes parmi des globules rouges normaux » (Griffiths *et al.* 2015, p. 767)

290), c'est-à-dire par une variante allélique, dénotée par « *S* », alternative à la variante physiologiquement normale d'un gène qui code pour l'hémoglobine, dénotée par « *A* ». De plus, il était déjà connu que, contrairement à la plupart des individus qui sont homozygotes pour cette mutation, c'est-à-dire qui sont homozygotes *SS*, ceux qui possèdent une copie de chaque variante de ce même gène, et qui sont donc hétérozygotes *AS*, présentent « un mélange de cette hémoglobine relativement insoluble [c'est-à-dire la variante *HbS*] et d'hémoglobine normale [*a mixture of this relatively insoluble haemoglobin and normal haemoglobin*'] [si bien que] leurs érythrocytes ne prennent donc pas une forme en faucille, du moins *in vivo* » (Allison 1954, p. 290). Il en découle que les questions auxquelles était confronté Allison (1954) étaient donc de nature essentiellement génétique, car elle consistaient à identifier une différence entre génotypes homozygotes *SS* et génotypes hétérozygotes *AS* qui fût à même de rendre compte de la distribution de fréquences génotypiques qui était, pour ainsi dire, « sous-jacente » à la distribution du trait « *HbS* » qu'il avait pu observer. C'est pourquoi, ayant constaté, par le biais d'une analyse phénotypique, que l'allèle *S* était « très répandu dans les régions humides de faible altitude, où le taux de paludisme est très élevé [*at high frequency in low-lying humid regions with very high levels of malaria*'], et presque absent dans les zones à haute altitude, comme autour de Nairobi » (Griffiths *et al.* 2015, p. 767), et en sachant que le parasite qui cause le paludisme (*Plasmodium falciparum*) infecte, précisément, les érythrocytes, Allison (1954) avait fini par émettre l'hypothèse que la persistance de cet allèle dans le *pool* génétique de telle ou telle population humaine, ainsi que son patron de distribution géographique s'expliqueraient par le fait que ce dernier conférerait « un certain degré de résistance à l'infection palustre » (« *some degree of resistance to malarial infection* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 768), et donc un avantage sélectif, aux organismes qui en sont porteurs. En conséquence, c'est précisément dans le

but de mettre à l'épreuve une telle hypothèse qu'il s'était résolu à mener d'autres études consistant à comparer les différents niveaux de « parasitémie » (« *parasitaemia* ») palustre (c'est-à-dire les différentes quantités de parasites *Plasmodium falciparum* présentes dans le sang) que l'on pouvait observer dans deux groupes qui étaient issus de la tribu ougandaise des Ganda et qui se composaient, respectivement, d'enfants « qui présentaient des traits drépanocytaires » (« *sickling* ») (c'est-à-dire d'enfants qui produisaient un mélange d'hémoglobine S et d'hémoglobine A, et qui étaient donc hétérozygotes AS) et d'enfants complètement sains (c'est-à-dire d'enfants qui étaient homozygotes AA) (Allison 1954, p. 291-292). Comme ces observations semblaient confirmer l'existence d'un lien causal entre la présence de l'allèle S et la résistance au paludisme³⁷⁷, Allison (1954) pouvait donc en conclure que

la proportion d'individus drépanocytaires dans une population donnée [*the proportion of individuals with sickle cells in any population*'] sera donc le résultat d'un équilibre entre deux facteurs [*the result of a balance between two factors*'] : la gravité du paludisme, qui tendra à augmenter la fréquence du gène [*the severity of malaria, which will tend to increase the frequency of the gene*'], et le taux d'élimination [*the rate of elimination*'] [des allèles S] chez les individus mourant d'une anémie drépanocytaire [causée, justement, par le fait de posséder un génotype homozygote SS]. Génétiquement parlant, il s'agit d'un polymorphisme équilibré où le génotype hétérozygote a un avantage sur l'un ou l'autre génotype homozygote [*genetically speaking, this is a balanced polymorphism where the heterozygote has an advantage over either homozygote.*'] (Allison 1954, p. 293).

Néanmoins, en quoi consiste, plus précisément, la relation que l'on pourrait identifier entre l'avantage sélectif dont semblent jouir les individus qui sont hétérozygotes pour le gène qui est causalement

³⁷⁷ Le groupe d'enfants porteurs de traits drépanocytaires comprenait 43 individus, dont 12, c'est-à-dire 27,9% du total des effectifs, présentaient un niveau de parasitémie élevé, alors que les restants 31, c'est-à-dire 72,1% du total, ne montraient que de faibles signes d'infection palustre. Parmi les enfants complètement sains, en revanche, 113 sur 247, c'est-à-dire 45,7% du total, présentaient un niveau de parasitémie élevé, alors que le niveau d'infection était faible chez les restants 134, c'est-à-dire 53,3% du total. Sur la base de ces observations, Allison (1954) pouvait donc en conclure ce qui suit : « Il est évident que l'incidence de la parasitémie est plus faible dans le groupe drépanocytaire que dans le groupe qui ne présente pas de drépanocytes [c'est-à-dire d'érythrocytes en forme de faucille] [*the incidence of parasitaemia is lower in the sickle-cell group than in the group without sickle cells*']. La différence est statistiquement significative ($\chi^2 = 5,1$ pour 1 degré de liberté). Afin de tester le plus grand nombre de familles possible, un seul enfant a été choisi dans chaque famille. Il n'y a aucune raison de supposer que ces groupes ne soient pas comparables, si ce n'est pour la présence ou l'absence du trait drépanocytaire [*There is no reason to suppose that these groups are not comparable, apart from the presence or absence of the sickle-cell trait*'] » (Allison 1954, p. 292).

associé aussi bien à la résistance au paludisme qu'à la drépanocytose, d'une part, et le fait que la population en question ait atteint un état de polymorphisme équilibré, d'autre part ? De quelle manière serait-il possible de prévoir l'évolution de la structure du *pool* génétique d'une telle population, sous l'action des deux pressions de sélection opposées dont faisait l'hypothèse Allison (1954) ?

2.1.2 Le polymorphisme équilibré et le principe de Hardy-Weinberg : une loi de couverture ?

C'est précisément sur les points que nous venons de soulever que la question de savoir en quoi il serait possible d'identifier quels sont les présupposés de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) qui ont été violés, lorsque la distribution des fréquences génotypiques que l'on a observées dans une population donnée est trop éloignée de la distribution que l'on peut déduire d'une telle loi, rejoint les problématiques qui ont animé les études d'Allison (1954). Pour étayer ce propos, nous pouvons considérer, encore une fois, une population qui se compose de N individus diploïdes pour un *locus* donné, qui peut être occupé par deux allèles alternatifs, à savoir A_1 et A_2 . Supposons, en outre, que la population en question se trouve dans un état d'équilibre de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), si bien qu'il est possible de décrire son *pool* génétique au moyen du vecteur de fréquences génotypiques

$$p^2 A_1A_1 : 2pq A_1A_2 : q^2 A_2A_2.$$

Si nous supposons également que, tout comme dans le cas du polymorphisme équilibré des allèles qui codent pour l'hémoglobine S et pour l'hémoglobine normale, les trois génotypes en question soient soumis à des pressions de sélection qui les affectent de manière différenciée, c'est-à-dire que l'un des présupposés fondamentaux de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) ait été violé, nous devons en conclure que le vecteur que nous venons d'écrire ne nous permet pas d'en déduire les fréquences des allèles A_1 et A_2 que l'on s'attendra à observer dans la population gamétique³⁷⁸ qu'engendreront les membres de la population adulte que nous sommes en train de considérer. Afin de quantifier la variation des fréquences alléliques qui est due aux différentes valeurs de *fitness* darwinienne – en tant qu'aptitude à la survie et à la reproduction (Dobzhansky 1951) – dont sont affectés les membres de la population en question, nous pouvons introduire un nouveau coefficient, dénoté par la lettre « W », c'est-à-dire la « *fitness* absolue », ou « valeur sélective

³⁷⁸ Si l'on suppose que tous les gamètes en fécondent d'autres, ou qu'ils soient fécondés par d'autres gamètes, l'on peut parler de population zygotique.

absolue » (« *absolute fitness* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 696). Il s'agit, plus précisément, d'une mesure à laquelle l'on peut attribuer deux significations biologiques distinctes, mais étroitement liées, puisque, au niveau phénotypique, elle correspond au « nombre d'enfants qu'engendre un individu donné » (« *the number of offspring that an individual has* »)³⁷⁹, alors que, au niveau génétique, elle se définit comme étant « le nombre d'allèles que tel ou tel individu lègue au *pool* génétique de sa population, pour un *locus* donné » (« *the number of alleles at a locus that an individual contributes to the gene pool* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 696). Il en découle que, si W_{11} , W_{12} et W_{22} sont les valeurs sélectives absolues – dans le sens génétique du terme – moyennes que l'on peut attribuer, respectivement, aux individus qui sont porteurs des génotypes A_{11} , A_{12} et A_{22} , alors nous pouvons en conclure que les nombres moyens d'allèles que les différents groupes génotypiques dont se compose la population en question lègueront, chacun, au *pool* génétique de la population gamétique correspondante seront les suivants :

A_{11}	A_{12}	A_{22}
p^2W_{11}	$2pqW_{12}$	q^2W_{22}

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699), c'est-à-dire, justement, les valeurs sélectives absolues (moyennes) des différents génotypes « pondérées », pour ainsi dire, par les fréquences relatives de ces derniers. Nous pouvons en déduire, par la suite, que « le nombre moyen d'allèles qu'un individu donné lèguera au *pool* génétique » (« *the average number of alleles contributed to the gene pool by an individual* ») des gamètes, c'est-à-dire « la valeur sélective (absolue) moyenne de la population en question » (« *the mean fitness of the population* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 699) ne sera rien d'autre que la somme de toutes ces différentes contributions moyennes :

$$\bar{W} = \frac{N(p^2W_{11}) + N(2pqW_{12}) + N(q^2W_{22})}{N} = p^2W_{11} + 2pqW_{12} + q^2W_{22}$$

³⁷⁹ « Pour un individu qui n'a pas de descendants [*'with no offspring'*], W est égale à 0, pour un individu qui a un descendant [*'with one offspring'*], W est égale à 1, pour un individu avec deux descendants [*'with two offspring'*], W est égale à 2, et ainsi de suite » (Griffiths *et al.* 2015, p. 696).

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699), si bien que le nombre total des allèles qui sont légués d'une génération à l'autre sera $N\bar{W}$. Il s'ensuit que les fréquences relatives des allèles A_1 et A_2 dans la population gamétique, et donc dans la génération successive de la population adulte³⁸⁰, seront, respectivement,

$$p' = \frac{N(p^2W_{11}) + \frac{N(2pqW_{12})}{2}}{N\bar{W}} = \frac{N(p^2W_{11}) + N(pqW_{12})}{N\bar{W}} = \frac{p^2W_{11} + pqW_{12}}{\bar{W}} = p \frac{pW_{11} + qW_{12}}{\bar{W}}$$

$$q' = (1 - p')$$

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699). Comme la quantité $pW_{11} + qW_{12}$ n'est rien d'autre que « la valeur sélective allélique ou valeur sélective moyenne des allèles [A_1] » (« *the allelic fitness or mean fitness of [A_1] alleles* »), c'est-à-dire W_1 , (Griffiths *et al.* 2015, p. 699)³⁸¹, nous pouvons réécrire les deux équations précédentes comme suit :

$$p' = p \frac{W_1}{\bar{W}}$$

$$q' = (1 - p')$$

³⁸⁰ L'on suppose, par conséquent, non seulement que tous les gamètes en fécondent d'autres, ou qu'ils soient fécondés par d'autres gamètes, mais également que tous les zygotes atteignent au moins l'âge de reproduction et constituent, par conséquent, les membres de la génération successive de la population en question.

³⁸¹ Il s'agit, notamment, d'une conséquence directe de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), puisque cette dernière nous permet d'affirmer que, dans la population que nous sommes en train de considérer, sont présentes Np copies de l'allèle A_1 , qui sont réparties en deux génotypes, à savoir A_{11} et A_{12} , dont les fréquences relatives sont p^2 et $2pq$. La valeur sélective moyenne de l'allèle A_1 n'est, en effet, rien d'autre que la moyenne des valeurs sélectives de ces deux génotypes, pondérée par les fractions du nombre total des copies de l'allèle en question qui appartiennent, respectivement, à l'un et à l'autre type, c'est-à-dire $W_1 = f_{1,A_{11}}W_{11} + f_{1,A_{12}}W_{12}$. Mais quelles sont donc les valeurs de $f_{1,A_{11}}$ et de $f_{1,A_{12}}$? Afin de calculer $f_{1,A_{11}}$, il suffit de considérer le nombre total des génotypes A_{11} qui sont présents dans la population, de le multiplier par le nombre d'allèles A_1 qui est contenu dans le génotype en question et de le diviser par le nombre total des copies de ce même allèle qui se trouvent dans la population. La loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) nous permet, en conséquence, d'en conclure que $f_{1,A_{11}} = \frac{(Np^2) \cdot 1}{Np} = \frac{Np^2}{Np} = p$. Si nous suivons le même procédé pour calculer $f_{1,A_{12}}$, en considérant le génotype A_{12} au lieu du génotype A_{11} , nous pouvons écrire que $f_{1,A_{12}} = \frac{(N2pq) \cdot \frac{1}{2}}{Np} = \frac{Npq}{Np} = q$. Il en découle que la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) implique que $W_1 = pW_{11} + qW_{12}$, ce qu'il fallait démontrer.

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699). En remplaçant les valeurs sélectives absolues W_1 et \bar{W} par les « valeurs sélectives relatives » (« *relative fitnesses* ») w_1 et \bar{w} – où, par « valeurs sélectives relatives », l'on entend des coefficients qui mesurent les valeurs sélectives des différents individus « relativement à un autre, normalement l'individu ayant la plus haute valeur sélective de toute la population » (« *relative to some other individual, usually the most fit individual in the population* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 697)³⁸² – nous obtenons les deux équations suivantes :

$$p' = p \frac{w_1}{\bar{w}}$$

$$q' = (1 - p')$$

Ce faisant, nous parvenons donc à calculer la variations des fréquences relatives des allèles A_1 et A_2 entre la première génération que nous avons considérée et la génération successive :

$$\Delta p = p' - p = p \frac{w_1}{\bar{w}} - p = \frac{p(w_1 - \bar{w})}{\bar{w}}$$

$$\Delta q = q' - q = (1 - p') - (1 - p) = p - p' = -\Delta p$$

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699), si bien que nous pouvons en conclure que, lorsque l'équilibre de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) est enfreint par la présence d'une pression de sélection, la variation, au fil des générations, de la fréquence relative de tel ou tel allèle dépend de sa fréquence « de départ », c'est-à-dire de sa fréquence à la génération immédiatement précédente (qui est, dans ce cas, p), ainsi que de l'écart, normalisé entre 0 et 1, qui sépare sa propre valeur sélective (relative) de la valeur sélective (relative) moyenne de la population (c'est-à-dire, dans ce cas, $\frac{w_1 - \bar{w}}{\bar{w}}$). Cela dit, comme la valeur sélective (relative) moyenne d'une population diploïde donnée, par rapport à un certain *locus*, n'est rien d'autre que la moyenne des valeurs sélectives alléliques (relatives) des deux allèles qui peuvent occuper ce même *locus*, et donc comme $\bar{w} = pw_1 + qw_2$ (Griffiths *et al.* 2015, p. 699), nous pouvons redéfinir la variation de la fréquence relative de l'allèle A_1 de la manière suivante :

³⁸² Cela signifie que « si l'individu X engendre deux descendants et l'individu ayant la plus haute valeur sélective, Y , en engendre 10, alors la valeur sélective relative de X est $w = \frac{2}{10} = 0,2$. La valeur sélective de Y est $w = \frac{10}{10} = 1$. Pour tous les 10 allèles que Y lègue à la génération suivante, X en léguera 2 [*For every 10 alleles Y contributes to the next generation, X will contribute 2*] » (Griffiths *et al.* 2015, p. 696).

$$\begin{aligned}\Delta p &= \frac{p(w_1 - \bar{w})}{\bar{w}} = \frac{p[w_1 - (pw_1 + qw_2)]}{\bar{w}} = \frac{p[w_1 - pw_1 - qw_2]}{\bar{w}} = \frac{p[(1-p)w_1 - qw_2]}{\bar{w}} \\ &= \frac{p(qw_1 - qw_2)}{\bar{w}} = \frac{pq(w_1 - w_2)}{\bar{w}}\end{aligned}$$

(Griffiths *et al.* 2015, p. 699), c'est-à-dire comme étant une fonction des fréquences de départ des allèles A_1 et A_2 (à savoir, respectivement, p et q), ainsi que de la différence entre leurs valeurs sélectives alléliques (relatives) (à savoir, respectivement, w_1 et w_2), normalisée par rapport à la valeur sélective (relative) moyenne de la population en question (c'est-à-dire \bar{w}). Mais en quoi consiste donc la signification biologique de cette expression algébrique ? En quoi pourrait-elle nous permettre de déduire une description du *pool* génétique d'une population qui se trouve dans un état de polymorphisme équilibré à partir de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) ?

Cette expression, que nous venons de dériver de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) sous l'hypothèse que le présupposé de l'absence de toute forme de sélection ait été violé, nous permet, par conséquent, de décrire en termes qualitatifs la dynamique de la variation des fréquences alléliques au sein de la population que nous sommes en train de considérer, et donc d'apporter une réponse à la question de savoir comment changera, au fil des générations, la structure de son *pool* génétique sous l'action d'une pression de sélection comme celle dont faisait l'hypothèse Allison (1954) afin de rendre compte de ses observations sur la persistance du trait drépanocytaire dans les populations qu'il avait étudiées. Plus précisément, nous pouvons nous demander en quoi consistent les conditions nécessaires afin que la population atteigne à nouveau un état d'équilibre, qui soit, en outre, un état de polymorphisme équilibré, tel que nous l'avons décrit plus haut. Comme première chose, nous pouvons remarquer que, afin que la population soit à l'équilibre, il faut que $\Delta p = 0$. Pour que cela se vérifie, il suffit que $p = 0$ ou que $q = 0$, c'est-à-dire qu'au moins l'un des deux allèles alternatifs, A_1 et A_2 , « ait été éliminé de la population » (« *has been eliminated from the population* ») (Griffiths *et al.* 2000). Comme le remarquent Griffiths *et al.* (2000), d'un point de vue mathématique, cela veut dire que, si l'on suppose que les fréquences de départ ne sont pas elles-mêmes égales à zéro, la différence entre les valeurs sélectives des deux allèles, $w_1 - w_2$, doit toujours être non nulle. Si elle est toujours positive, alors la quantité Δp sera, à son tour, toujours positive et p augmentera de génération en génération, quelle que soit sa valeur, jusqu'à ce que $p = 1$ et $q = 0$, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'allèle A_1 ne se fixe dans la population, au détriment de l'allèle A_2 . Si elle est toujours négative, alors, comme $\Delta q = -\Delta p$, la quantité Δq sera toujours positive et q augmentera de génération en génération, quelle que soit sa valeur, jusqu'à ce que $q = 1$ et $p = 0$, c'est-à-dire jusqu'à

ce que l'allèle A_2 ne se fixe dans la population, au détriment de l'allèle A_1 . D'un point de vue génétique, « la condition de possibilité pour une telle forme de sélection unidirectionnelle [*the condition for such unidirectional selection*'] consiste en ceci que la valeur sélective [du génotype hétérozygote] se situe quelque part entre les valeurs sélectives des deux [génotypes homozygotes] [*the heterozygote fitness be somewhere between the fitnesses of the two homozygotes*'] » (Griffiths *et al.* 2000). En effet, par définition,

$$w_1 - w_2 = pw_{11} + qw_{12} - (qw_{22} + pw_{12}) = pw_{11} + qw_{12} - qw_{22} - pw_{12} = p(w_{11} - w_{12}) + q(w_{12} - w_{22}),$$

si bien que, si nous supposons que $w_{11} > w_{12} > w_{22}$, nous pouvons en conclure que $w_{11} - w_{12}$ et $w_{12} - w_{22}$ sont des quantités toujours positives, et donc que, quelles que soient les valeurs de p et de q , $p(w_{11} - w_{12}) + q(w_{12} - w_{22}) > 0$. Cela implique, par conséquent, que la différence $w_1 - w_2$ est toujours positive, ce qui représente précisément la condition mathématique qui est nécessaire afin qu'une telle valeur continue d'augmenter, jusqu'à ce que l'allèle A_1 ne se fixe au sein de la population, au détriment de l'allèle A_2 . Symétriquement, si nous supposons que $w_{22} > w_{12} > w_{11}$, alors nous pouvons en déduire que $w_{11} - w_{12}$ et $w_{12} - w_{22}$ sont des quantités toujours négatives, et donc que, quelles que soient les valeurs de p et de q , $p(w_{11} - w_{12}) + q(w_{12} - w_{22}) < 0$. Il en découle, en conséquence, que la différence $w_1 - w_2$ est toujours négative, ce qui constitue, justement, la condition mathématique qui est nécessaire afin qu'une telle valeur ne cesse d'augmenter, jusqu'à ce que l'allèle A_2 ne se fixe au sein de la population, au détriment de l'allèle A_1 . Néanmoins, comme le rappellent, encore une fois, Griffiths *et al.* (2000), nous pouvons également considérer une troisième condition suffisante pour que $\Delta p = 0$, qui n'implique l'élimination d'aucun des deux allèles alternatifs qui sont présents dans la population, c'est-à-dire la condition que $(w_1 - w_2) = 0$, si bien que $w_1 = w_2$, alors que $p \neq 0$ et $q \neq 0$. En effet, si nous supposons qu'il existe des valeurs d'équilibre $0 < \hat{p} < 1$ et $0 < \hat{q} < 1$ qui sont telles que $w_1 = w_2$, nous pouvons écrire l'identité suivante :

$$w_1 - w_2 = \hat{p}w_{11} + \hat{q}w_{12} - (\hat{q}w_{22} + \hat{p}w_{12}) = 0$$

(Griffiths *et al.* 2000). En outre, de simples manipulations algébriques³⁸³ nous permettent d'affirmer que

$$\hat{p} = \frac{w_{22} - w_{12}}{(w_{11} - w_{12} + w_{22} - w_{12})}$$

c'est-à-dire que « la valeur d'équilibre [de la fréquence de l'allèle A_1] est un simple rapport des différences de valeur sélective entre les génotypes homozygotes et le génotype hétérozygote » (« *the equilibrium value is a simple ratio of the differences in fitness between the homozygotes and the heterozygote* ») (Griffiths *et al.* 2000), d'où il s'ensuit également que $\hat{q} = (1 - \hat{p})$. Cela dit, quelles sont, encore une fois, les conditions génétiques qui correspondent à cette condition mathématique ? Comme nous l'avons remarqué plus haut, la condition génétique qui correspond à la condition mathématique qui est nécessaire pour que la valeur $w_1 - w_2$ soit toujours non nulle consiste en ceci que la valeur sélective (relative moyenne) du génotype hétérozygote doit être intermédiaire entre les valeurs sélectives (relatives moyennes) des génotypes homozygotes. Par conséquent, nous pouvons en conclure que la condition génétique qui est nécessaire pour que $w_1 - w_2$ s'annule est que le génotype hétérozygote ait « une valeur sélective qui est plus extrême que celle de l'un ou de l'autre génotype homozygote » (« *a fitness that is more extreme than either homozygote* ») (Griffiths *et al.* 2000). Il faut préciser, néanmoins, que, si $w_{12} < w_{11}$ et $w_{12} < w_{22}$, c'est-à-dire si la population en question se trouve dans une situation de « sous-dominance » (« *underdominance* »), alors les fréquences \hat{p} et \hat{q} définiront un état d'« équilibre instable » (« *unstable equilibrium* ») (Griffiths *et al.* 2000). Il s'agit, en effet, d'un état dans lequel

il n'y aura pas de changement de fréquence si la population possède exactement cette valeur de p [*'there will be no change in frequency if the population has exactly this value of p '*], mais la fréquence s'éloignera de l'équilibre (vers $p = 0$ ou $p = 1$) si se produit même la moindre perturbation de la fréquence d'équilibre [*'if the slightest perturbation of frequency occurs'*] (Griffiths *et al.* 2000).

Afin d'étayer ce propos, nous devons analyser ce qui se passe lorsque la valeur de p s'écarte de sa valeur d'équilibre, \hat{p} , c'est-à-dire lorsque $p > \hat{p}$ ou $p < \hat{p}$. Ce faisant, nous pouvons nous apercevoir

³⁸³ Plus précisément, comme $\hat{q} = (1 - \hat{p})$, nous pouvons écrire que $\hat{p}w_{11} + (1 - \hat{p})w_{12} - (1 - \hat{p})w_{22} - \hat{p}w_{12} = 0$, d'où nous pouvons en déduire, successivement, que $\hat{p}w_{11} + w_{12} - \hat{p}w_{12} - w_{22} + \hat{p}w_{22} - \hat{p}w_{12} = 0$, que $\hat{p}w_{11} - \hat{p}w_{12} + \hat{p}w_{22} - \hat{p}w_{12} = w_{22} - w_{12}$, et donc que $\hat{p}(w_{11} - w_{12} + w_{22} - w_{12}) = w_{22} - w_{12}$, d'où découle l'expression de la valeur de \hat{p} que nous avons retenue.

que, si $w_{12} < w_{11}$ et $w_{12} < w_{22}$, chaque fois que la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus grande que \hat{p} , si bien que la valeur de $q = (1 - p)$ devient plus petite que $\hat{q} = (1 - \hat{p})$, la valeur sélective (relative moyenne) de l'allèle A_1 (w_1) augmente au détriment de celle de l'allèle A_2 (w_2), ce qui cause, en retour, une ultérieure augmentation de la valeur de p et une ultérieure diminution de la valeur de q , jusqu'à ce que le *pool* génétique de la population en question n'atteigne un état où $p = 1$ et $q = 0$ ³⁸⁴. Symétriquement, toujours si $w_{12} < w_{11}$ et $w_{12} < w_{22}$, chaque fois que la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus petite que \hat{p} , si bien que la valeur de $q = (1 - p)$ devient plus grande que $\hat{q} = (1 - \hat{p})$, la valeur sélective (relative moyenne) de l'allèle A_1 (w_1) diminue, du moins par rapport à celle de l'allèle A_2 (w_2), ce qui entraîne, en retour, une ultérieure diminution de la valeur de p et une ultérieure augmentation de la valeur de q , jusqu'à ce que le *pool* génétique de la population en question n'atteigne un état où $p = 0$ et $q = 1$ ³⁸⁵. Par conséquent, c'est précisément pour de telles raisons que, si $w_{12} < w_{11}$ et $w_{12} < w_{22}$, l'état d'équilibre qu'atteignent les fréquences alléliques p et q est instable. Au contraire, si $w_{12} > w_{11}$ et $w_{12} > w_{22}$, c'est-à-dire si la population se trouve dans une situation de « superdominance » (« *overdominance* »), alors les fréquences alléliques p et q finiront par atteindre des valeurs d'équilibre qui seront stables (Griffiths *et al.* 2000). En effet, lorsque la valeur sélective (relative moyenne) du génotype hétérozygote est supérieure à celles des deux génotypes homozygotes, chaque fois que la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus grande que \hat{p} et donc que la valeur de $q = (1 - p)$ devient plus petite que $\hat{q} = (1 - \hat{p})$, la valeur sélective (relative moyenne) de l'allèle A_1 (w_1) diminue relativement à celle de l'allèle A_2 (w_2), ce qui entraîne une diminution de la valeur de p et une augmentation de celle de q , jusqu'à ce que le *pool* génétique de la population en question ne revienne à un état où $p = \hat{p}$ et $q =$

³⁸⁴ Rappelons que, par définition, $w_1 - w_2 = p(w_{11} - w_{12}) + q(w_{12} - w_{22})$, si bien que, lorsque $p = \hat{p}$ et $q = \hat{q}$, $w_1 - w_2 = 0 = \hat{p}(w_{11} - w_{12}) + \hat{q}(w_{12} - w_{22})$, ce qui implique que, à l'état d'équilibre, $|\hat{p}(w_{11} - w_{12})| = |\hat{q}(w_{12} - w_{22})|$. Nous pouvons observer, en outre, que, si $w_{12} < w_{11}$ et $w_{12} < w_{22}$, alors $p(w_{11} - w_{12}) > 0$ et $q(w_{12} - w_{22}) < 0$. En conséquence, comme, si $p > \hat{p}$, alors $q = (1 - p) < \hat{q} = (1 - \hat{p})$, nous pouvons en conclure que, si la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus grande que sa valeur d'équilibre, alors la valeur de q devient, quoique toujours en mesure infinitésimale, plus petite que sa valeur d'équilibre, ce qui implique que $|p(w_{11} - w_{12})| > |q(w_{12} - w_{22})|$, et donc que $w_1 - w_2 > 0$.

³⁸⁵ Comme, si $p < \hat{p}$, alors $q = (1 - p) > \hat{q} = (1 - \hat{p})$, nous pouvons également en conclure que, si la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus petite que sa valeur d'équilibre, alors la valeur de q devient, quoique toujours en mesure infinitésimale, plus grande que sa valeur d'équilibre, ce qui implique que $|p(w_{11} - w_{12})| < |q(w_{12} - w_{22})|$, et donc que $w_1 - w_2 < 0$.

\hat{q} ³⁸⁶. En revanche, toujours lorsque $w_{12} > w_{11}$ et $w_{12} > w_{22}$, chaque fois que la valeur de p devient, même infinitésimalement, plus petite que \hat{p} et donc que la valeur de $q = (1 - p)$ devient plus grande que $\hat{q} = (1 - \hat{p})$, la valeur sélective (relative moyenne) de l'allèle A_1 (w_1) augmente au détriment de celle de l'allèle A_2 , (w_2), ce qui cause une augmentation de la valeur de p et une diminution de celle de q , jusqu'à ce que le *pool* génétique de la population en question ne revienne, encore une fois, à un état où $p = \hat{p}$ et $q = \hat{q}$ ³⁸⁷. C'est précisément sur la base de telles considérations que nous pouvons donc en conclure que les conséquences que nous pouvons déduire de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), sous l'hypothèse que le présupposé de l'absence de toute pression sélective ait été violé, nous permettent d'affirmer que, lorsque la population que nous sommes en train de considérer se trouve dans une situation de superdominance (c'est-à-dire lorsque les porteurs d'un génotype hétérozygote jouissent d'un avantage sélectif par rapport aux porteurs de génotypes homozygotes), alors son *pool* génétique finira par atteindre un état de polymorphisme équilibré, où les deux variantes alléliques A_1 et A_2 posséderont des valeurs d'équilibre, dites « intermédiaires », $0 < \hat{p} < 1$ et $0 < \hat{q} < 1$.

En conséquence, c'est justement la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), en tant que modèle nul de la génétique théorique des populations, qui nous donne les moyens de répondre à la question de savoir de quelle manière il serait possible de prévoir l'évolution de la structure du *pool* génétique d'une population donnée, sous l'action de deux pressions de sélection opposées telle que celle que postulait Allison (1954). Par ce même biais, elle nous donne également les moyens de répondre à la question de savoir en quoi consiste le lien que l'on pourrait établir entre l'avantage sélectif dont semblent jouir les individus qui sont hétérozygotes pour le gène qui est causalement associé aussi bien à la résistance au paludisme qu'à la drépanocytose, d'une part, et le fait que les populations observées aient atteint un état de polymorphisme équilibré, d'autre part. Il s'ensuit que la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) peut être considérée, toujours en tant que modèle nul de la génétique théorique des populations, comme étant une possible loi de couverture qui permettrait de rendre compte des phénomènes de polymorphisme équilibré, c'est-à-dire également du phénomène que l'on appelle communément « effet du fondateur » et dont on peut se servir pour expliquer, à son tour, la radiation adaptative des pinsons des Darwin. En effet, comme le

³⁸⁶ Lorsque la valeur sélective (relative moyenne) du génotype hétérozygote est supérieure à celles des deux génotypes homozygotes, $p(w_{11} - w_{12}) < 0$ et $q(w_{12} - w_{22}) > 0$. En conséquence, chaque fois que $p > \hat{p}$ et donc $q = (1 - p) < \hat{q} = (1 - \hat{p})$, aussi faible que puisse être un tel écart, alors $w_1 - w_2 < 0$, puisque la quantité négative $p(w_{11} - w_{12})$ sera plus grande que la quantité positive $q(w_{12} - w_{22})$.

³⁸⁷ Chaque fois que, bien qu'en mesure infinitésimale, $p < \hat{p}$ et $q = (1 - p) > \hat{q} = (1 - \hat{p})$, alors $w_1 - w_2 > 0$, puisque la quantité négative $p(w_{11} - w_{12})$ sera plus petite que la quantité positive $q(w_{12} - w_{22})$.

rappelait Ruse (1973) lui-même, le modèle nomologico-déductif de l'explication se résume au schéma suivant :

$$C_1, C_2, \dots C_m$$

$$\frac{L_1, L_2, \dots L_n}{E}$$

(Ruse 1973, p. 42), pourvu que $n \geq 1$, où $C_1, C_2, \dots C_m$ représentent des énoncés qui décrivent les « conditions initiales » (« *initial conditions* ») (Ruse 1973, p. 42) qui permettent d'appliquer les lois de couverture $L_1, L_2, \dots L_n$ – c'est-à-dire des lois qui recouvrent tel ou tel *explanandum* en tant que cas particulier d'un système de régularités nomologiques et qui le mettent en relation, par ce même biais, avec des énoncés décrivant, justement, les conditions initiales pertinentes – aux phénomènes à expliquer, qui sont décrits, à leur tour, par l'*explanandum* « E ». Comme nous l'avons remarqué plus haut, d'après un tel modèle, expliquer tel ou tel ensemble de phénomènes consiste à déduire l'*explanandum* qui le décrit à partir d'un ensemble de lois de couverture, ainsi que des énoncés qui définissent les conditions initiales pertinentes. Nous pouvons donc considérer que, dans le cas du polymorphisme équilibré, nous disposons d'une loi de couverture, c'est-à-dire la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), et d'un ensemble d'énoncés qui décrivent des conditions initiales telles que la taille de la population en question, sa structure génétique, etc., ainsi que, notamment, le fait que le présumé de l'absence de toute pression de sélection ait été violé. Comme nous l'avons mis en évidence dans la section que nous sommes en train de conclure, tous ces *explanantia* nous permettent d'en déduire, par le biais de quelques manipulations algébriques, un *explanandum* qui n'est rien d'autre qu'une description des fréquences d'équilibre $p = \hat{p}$ et $q = \hat{q}$ qui permettent à deux allèles tels que l'allèle A , qui code pour l'hémoglobine A, et l'allèle S , qui code pour l'hémoglobine S, de persister, de génération en génération, dans un état de polymorphisme équilibré.

En outre, nous pouvons également estimer que nous disposons également d'un ensemble de principes pont qui font le lien entre la situation génétique que décrit ce même *explanandum* et l'ensemble de caractères phénotypiques qu'on peut y associer, tels que le principe pont qu'énonce Ruse (1973) lui-même dans son analyse de l'étude de R. R. Race et R. Sanger (1954) sur « les groupes sanguins chez l'homme » (« *blood groups in man* »)³⁸⁸. Une telle appréciation est d'autant plus

³⁸⁸ « Il est évident que, dans ce cas, les auteurs de l'étude s'appuyaient sur certains principes pont. En particulier, ils supposaient que si une personne avait un groupe sanguin M , elle aurait également le gène M [*they were assuming that if*

justifiée que, de manière plus général, nous pouvons avancer que le présupposé fondamental de la Synthèse Moderne d'après lequel l'évolution, en tant que processus naturel, ne serait qu'une « extrapolation » de processus génétiques (Mayr 1980a, 1998a) constituerait une sorte de « principe pont schématique » permettant de relier l'évolution de la composition phénotypique d'une population donnée à celle de sa composition génotypique. Par conséquent, c'est précisément par le truchement » de ces principes pont que, pourvu que les conditions génétiques nécessaires au maintien d'un état de polymorphisme équilibré aient été décrites, nous pouvons en déduire une explication de l'effet du fondateur et, dans le cas particulier des pinsons de Darwin, une explication de leur radiation adaptative. Il s'agit, d'ailleurs, d'une démarche qui est proche de celle qu'ont suggéré de suivre, justement, Peter R. Grant et ses collaborateurs (Price & Grant 1985 ; Grant *et al.* 2006 ; Grant & Grant 2014) dans le but d'élucider les bases génétiques de la diversification morphologique des différentes espèces de *Geospiza*, au vu du fait que « la comparaison statique » (« *static comparison* ») de leur variabilité génétique semble indiquer que « la divergence génétique qui a accompagné la spéciation a impliqué l'évolution de différences développementales » (« *the genetic divergence that accompanied species formation involved evolution of developmental differences* ») (Grant & Grant 2014, p. 234)³⁸⁹. Plus généralement, si nous considérons – comme le faisait, encore une fois, Ruse

a person had M-type blood, then he would have the M gene'], etc. C'est ainsi qu'ils s'en servaient pour déduire des rapports attendus ou effectifs [entre les fréquences de telle ou telle autre variante] au niveau phénotypiques [*expected and actual ratios at the phenotypic level*] à partir des rapports entre fréquences que l'on pouvait dériver de la loi de Hardy-Weinberg au niveau génotypique [*Hardy-Weinberg ratios at the genotypic level*']. En outre, ces auteurs explicitent les principes qui permettent de faire le lien entre le génotype et le phénotype [*the principles bridging genotype and phenotype*'], et (puisque les caractéristiques phénotypiques pertinentes ne sont pas directement observables) ils comblent l'écart entre le phénotype et l'observation [*they fill in the gap between phenotype and observation*'] » (Ruse 1973, p. 36), comme lorsqu'ils écrivent que, « en théorie, il existe deux gènes alléomorphes *M* et *N*, qui déterminent chacun la présence de l'antigène correspondant sur les globules rouges » (« *According to the theory there are two allelomorphous genes M and N, either of which determines the presence of the equivalent antigen on the red cells* »), si bien qu'ils peuvent en déduire le tableau d'associations génotypes-groupes sanguins qui suit :

Génotype	Groupe sanguin
<i>MM</i>	<i>M</i>
<i>MN</i>	<i>M</i> ou <i>N</i>
<i>NN</i>	<i>N</i>

(Race & Sanger 1954, p. 54 ; cité par Ruse 1973, p. 36-37).

³⁸⁹ « L'une des questions que devront affronter de futures recherches est celle de savoir si de tels changements nécessitent une nouvelle mutation, ou si le brassage de la variation existante constitue tout ce qui est nécessaire pour produire

(1973) – que la manière dont la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) explique le polymorphisme équilibré, ainsi que l'effet du fondateur, constitue un exemple paradigmatique des explications que l'on peut formuler sur la base de la génétique (théorique) des populations en tant que théorie génétique de l'évolution, nous pouvons en conclure, en outre, non seulement que de telles explications « partagent la même forme que prennent les explications des sciences physiques » (« *share the same form as do those of the physical sciences* ») (Ruse 1973, p. 46), mais également qu'il serait possible, du moins en principe, de les étendre à des phénomènes évolutifs qui relèvent d'autres branches des sciences de la vie. C'est précisément sur la base de telles considérations que nous pouvons justifier aussi bien la thèse d'après laquelle la génétique (théorique) des populations constituerait le noyau conceptuel de la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel, que la thèse d'après laquelle on pourrait se servir de la première comme fondement pour la formalisation, quoique seulement partielle et potentielle, de la seconde. Cela dit, comme nous l'avons anticipé plus haut, les arguments qu'a développés Ruse (1973) ont fait l'objet d'un certain nombre d'objections, comme celles qui ont été soulevées par John Beatty (1980a, 1980b, 1987) et, notamment, par Paul Thompson (1989). Ce dernier a, en effet, résumé les différentes critiques qui ont pu être adressées à l'axiomatisation de Ruse (1973) en trois points principaux. En quoi consistent, en conséquence, de telles critiques et quelles conclusions pouvons-nous en tirer au sujet d'un tel projet d'axiomatisation et de formalisation (*stricto sensu*) de la théorie synthétique, à la fois en tant que théorie génétique de l'évolution et en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

2.2 Jusqu'à quel point la théorie synthétique est-elle une théorie génétique ?

Comme première chose, Thompson (1989) a avancé que la manière dont Ruse (1973) avait dérivé le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) à partir de la première loi de Mendel (1866) ne saurait être considérée comme étant une déduction, pour ainsi dire, « substantielle », c'est-à-dire comme étant une déduction qui permet d'accroître la portée explicative des prémisses de départ. Plus précisément, il a affirmé que, du moins tel qu'il est présenté dans l'ouvrage de Ruse (1973), le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) ne serait rien d'autre qu'une explicitation du contenu de la loi mendélienne de la ségrégation, qui n'en modifierait, par conséquent, en rien la portée explicative. Cela découlerait du fait que le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) consisterait, justement, à attribuer des valeurs explicites à des paramètres qui

précisément la bonne combinaison de gènes dans la formation d'une nouvelle espèce [*'the shuffling of existing variation is all that is necessary to produce just the right combination of genes in the new species'*] » (Grant & Grant 2014, p. 235).

permettent de décrire le mécanisme de répartition des facteurs héréditaires parentaux dans la progéniture que la première loi de Mendel (1866) définit, de façon purement abstraite, sous la forme d'un espace de toutes les possibles combinaisons d'allèles parentaux pour un *locus* donné. Nous pouvons donc comprendre une telle objection dans les termes suivants : le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) se limiterait à décrire explicitement l'effet du système d'hérédité mendélienne que définit la loi de la ségrégation sur la composition génétique de telle ou telle population, étant donné un certain nombre de conditions particulières, c'est-à-dire « pour un seul et même *locus* biallélique dans une population qui se reproduit aléatoirement, et non pas dans une population autogame » (« *the effect of Mendelian inheritance for a single locus with two alleles in a random breeding population instead of one which was self-fertilized* ») (Provine 1971 ; 2001, p. 132). Il en découle que, selon Thompson (1989), il serait impossible de considérer le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) comme étant une conséquence logique véritablement significative (c'est-à-dire douée d'un contenu informationnel et d'un pouvoir explicatif qui lui seraient propres) des lois de Mendel (1866)³⁹⁰, contrairement à ce que l'on peut affirmer, par exemple, de la loi de la chute des corps de Galilée (1604) en tant que conséquence logique des lois de la dynamique de Newton (1687), et notamment de la deuxième – dans la mesure où la première permet de rendre compte d'un comportement local des corps physiques qui n'est pas expliqué de manière exhaustive par les lois de la dynamique newtonienne, dans leur forme la plus générale, c'est-à-dire le fait que, près de la surface terrestre, ces derniers tombent avec la même accélération, indépendamment de leur masse³⁹¹. Deuxièmement, Thompson (1989) a également réitéré l'avis qu'avait déjà exprimé

³⁹⁰ « La première loi de Mendel *définit* la transmission héréditaire des gènes, à un *locus* donné, comme étant un produit cartésien des deux ensembles de gènes qui occupent les *loci* correspondants chez les parents [*'a Cartesian product of the two parental sets of genes at the corresponding parental loci'*]. La loi de Hardy-Weinberg ne fait qu'*expliciter*, en prenant pour référence des fréquences d'accouplement abstraites, le produit cartésien qui est *défini* par la loi de Mendel [*'state the Cartesian product, under abstract mating frequencies, which Mendel's law defines'*]. Bien que, dans un certain sens formel du terme [*'in a formal sense'*], les énoncés qui précisent la signification d'une affirmation ou qui explicitent la nature d'un état de choses qui est défini par un autre énoncé [*'statements specifying the meaning of a claim or spelling out the nature of a defined state of affairs'*] sont des déductions que l'on peut tirer de l'affirmation ou de la définition en question, des déductions d'une telle nature sont triviales et ne constituent guère le type de déductions substantielles [*'the kind of significant deductions'*] que l'on estime être caractéristiques des théories en tant que structures axiomatico-déductives [*'theories as axiomatic-deductive structures'*] » (Thompson 1989, p. 63).

³⁹¹ Pour nous en rendre compte, il nous suffit de prendre en considération la manière dont Thompson (1989) lui-même a déduit, en guise d'exemple, la loi de Galilée (1604) à partir de la deuxième loi de Newton (1687). Dans sa formulation générale, cette dernière affirme, en effet, que $F = ma$, où F est la force s'exerçant sur un corps, de masse m , qui se trouve dans un état de mouvement (rectiligne) d'accélération $a = \frac{F}{m}$ (Thompson 1989, p. 46). Dans le cas d'un corps « en chute

John Beatty (1980b) lorsqu'il avait remarqué que ni la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), ni celles de Mendel ne sauraient constituer de véritables axiomes pour la théorie de l'évolution. La raison en serait que

le mécanisme méiotique normal [*'the normal meiotic mechanism'*] que décrit [ou plutôt, pour reprendre la distinction de Thompson (1989), que définit] la [première] loi de Mendel, et qui est présupposé par la loi de Hardy-Weinberg, est en lui-même un trait qui possède un fondement génétique et qui est sujet au changement évolutif [*is itself a genetically based trait subject to evolutionary change*] » (Beatty 1980b, p. 407).

libre » (« *free-falling* »), qui se trouve près de la surface terrestre, F n'est rien d'autre que « la force d'attraction gravitationnelle [*'the force of gravitational attraction'*] (qui est égale à la masse gravitationnelle [*'the gravitational mass'*] du corps en question, m_g , multipliée par la force gravitationnelle par unité de masse [*'the gravitational force per unit mass,'*], g) », alors que $m = m_i$, où m_i est la « masse inertielle » (« *inertial mass* ») de ce même corps (Thompson 1989, p. 46). Il en découle que, dans l'hypothèse que « la résistance de l'air [serait] négligeable » (« *air resistance is negligible* »),

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \rightarrow \mathbf{a} = \frac{m_g}{m_i} \mathbf{g}$$

(Thompson 1989, p. 46). Comme le rapport $\frac{m_g}{m_i}$ est constant pour tous les objets et comme, lorsqu'on les définit par rapport à la même unité de mesure (Kg), $m_g = m_i$, nous pouvons écrire que $\mathbf{a} = \mathbf{g}$. C'est justement à cette étape de notre démonstration que, afin de pouvoir caractériser le phénomène de la chute libre au moyen de la deuxième loi de Newton (1687), nous devons introduire une hypothèse supplémentaire, qui n'est rien d'autre qu'un présupposé qui est spécifique à la loi de Galilée (1604). Il s'agit, plus précisément, de l'hypothèse d'après laquelle, vu que nous sommes en train de considérer un corps qui se trouve près de la surface de la terre, nous pouvons estimer que l'accélération résultant de la force d'attraction que la seconde exerce sur le premier sera constante (en direction, en orientation et en intensité) tout au long de la chute. En conséquence, grâce à cette hypothèse, nous pouvons compléter notre déduction de la manière suivante :

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{v}}{t} = \mathbf{g} \rightarrow \mathbf{v} = \mathbf{g}t \rightarrow \mathbf{d} = \int \mathbf{g}t \, dt \rightarrow \mathbf{d} = \frac{\mathbf{g}t^2}{2}$$

(Thompson 1989, p. 47), où \mathbf{v} est la vitesse du corps en question, \mathbf{d} est la distance qu'il parcourt au cours de sa chute et $\mathbf{d} = \frac{\mathbf{g}t^2}{2}$ est, précisément, l'énoncé de la loi de Galilée (1604). Par conséquent, c'est précisément dans la mesure où, afin de déduire la loi de Galilée (1604) à partir de la deuxième loi de Newton (1687), il est nécessaire d'avoir recours à un présupposé qui est spécifique à la première que nous pouvons en conclure qu'une telle déduction n'est pas triviale.

Autrement dit, d'après Beatty (1980b) et Thompson (1989), fonder la théorie synthétique de l'évolution sur la génétique des populations signifierait procéder à rebours, aussi bien d'un point de vue ontologique que d'un point de vue logico-épistémologique : tout comme c'est l'évolution, en tant que processus naturel, qui produit ses propres bases génétique, et non pas l'inverse, ce serait la théorie de l'évolution par sélection naturelle, dans sa forme la plus globale et la plus générale, qui permettrait de déduire les principes fondamentaux de la génétique – qu'il s'agisse de la génétique mendélienne, de la génétique des populations, voire de toute sorte de théorie de l'hérédité (au niveau individuel ou au niveau populationnel)³⁹² –, et non pas l'inverse. Troisièmement, le dernier problème que Thompson (1989) a relevé dans l'axiomatisation proposé par Ruse (1973) consiste en ceci que ce dernier avait accepté, dans la droite ligne de Simpson (1953) et de Mayr (1963), « le présupposé discutabile d'après lequel l'évolution est le résultat de l'accumulation de petits changements » (« *the questionable assumption that evolution is the result of the accumulation of small changes* ») (Thompson 1989, p. 60). Plus précisément, Thompson (1989) a insisté, à plusieurs reprises, sur le fait qu'un tel présupposé occupe une place centrale dans l'argument de Ruse (1973) – et notamment dans l'argument de Ruse (1973) tel que nous l'avons reconstruit dans ce chapitre – dans la mesure où il permet, justement, d'étayer la thèse d'après laquelle la génétique (théorique) des populations formerait le noyau conceptuel de la théorie synthétique de l'évolution. Afin de pouvoir affirmer que la génétique (théorique) des populations constitue le fondement de l'étude de l'évolution, il est, en effet, nécessaire de montrer en quoi une telle discipline décrit des mécanismes qui seraient à même

³⁹² Comme l'a précisé Thompson (1989), en effet, « l'argument de Beatty est implicitement de portée générale [*implicitly generic*] : cela veut dire que, bien qu'il l'ait formulé en faisant référence aux lois de Mendel [*in terms of Mendel's laws*], le point essentiel de son argument est que *n'importe quel* système d'hérédité sera un système qui aura été le fruit d'un processus évolutif, et qui nécessitera, par conséquent, une explication évolutive [*any system of heredity will be an evolved system, and hence in need of an evolutionary explanation*]. Cet argument général se formule de manière simple. Les organismes sont le produit de l'évolution. En conséquence, la manière dont ils se reproduisent est elle-même un produit de l'évolution. En conséquence, les lois qui décrivent les mécanismes de reproduction, qui incluront la transmission biologique d'informations biologiques, sont des lois qui décrivent un système qui a été le fruit d'un processus évolutif. Par conséquent, ces lois ne peuvent pas être des axiomes d'une théorie de l'évolution [*Hence, laws describing the mechanisms of reproduction, which will include the biological transmission of biological information, are describing an evolved system. Therefore, these laws cannot be axioms of a theory of evolution*] » (Thompson 1989, p. 60). Nous pouvons également remarquer que R. A. Fisher (1932) avait déjà avancé des arguments similaires dans un article consacré à « l'impact de la génétique sur les théories de l'évolution » (« *the bearing of genetics on theories of evolution* »), lorsqu'il avait observé, par exemple, que « la récessivité des mutations est elle-même la conséquence d'un processus évolutif prolongé, au moyen duquel chaque espèce réagit aux mutations délétères par lesquelles elle est constamment marquée » (« *the recessiveness of mutations is itself a consequence of a prolonged evolutionary process, by which each species reacts to the unfavourable mutations with which it is persistently peppered* ») (Fisher 1932, p. 286).

de produire tous les phénomènes évolutifs. Pour ce faire, il faut également établir que « les événements [évolutifs] à large échelle doivent être le résultat (effet cumulatif) de changements qui interviennent au niveau de la génétique des populations » (« *large-scale events must be the result (cumulative effect) of population-genetical-level changes* »). En conséquence, c'est précisément parce qu'il considérait que toute hypothèse évolutive de nature « gradualiste » (« *gradualist* ») et « extrapolationniste » (« *extrapolationist* ») avait été durablement remise en question (Eldredge & Gould 1972, 1977 ; Gould 1980b, 1980c, 1981, 1982 ; Orzack 1981 ; Stebbins & Ayala 1981 ; White 1981 ; Eldredge 1985a, 1985b), que Thompson (1989) pouvait en conclure que l'argument de Ruse (1973) reposait sur un présupposé erroné. Cela dit, quelles conclusions pourrions-nous tirer de toutes ces critiques de l'axiomatisation qu'a proposée ce dernier ? En quoi ces mêmes critiques nous aideraient-elles à répondre à la question de savoir s'il serait possible de se servir de la conception classique des théories scientifiques comme cadre analytique pour la formalisation de la théorie synthétique de l'évolution, dans la double acception du terme ?

Afin de répondre à de telles questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.2.1), en quoi les objections de Thompson (1989) deviennent moins pertinentes lorsqu'on considère l'axiomatisation de Ruse (1973) comme ayant pour objet non pas la théorie de l'évolution en tant que telle, mais, justement, la théorie synthétique de l'évolution, à la fois comme théorie génétique de l'évolution et comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie. La théorie synthétique constitue, en effet, un cadre théorique et conceptuel dans lequel les fondements génétiques des phénomènes évolutifs jouent un rôle prépondérant, comme l'on peut s'en apercevoir si l'on analyse, encore une fois, les écrits de Theodosius Dobzhansky (1951, 1970), et notamment les deux dernières éditions de *Genetics and the Origin of Species*. C'est ainsi que nous nous poserons la question suivante : En quoi serait-il possible de proposer une formalisation de la théorie synthétique en prenant modèle sur la conception classique des théories scientifiques et en « croisant », pour ainsi dire, les thèses de Ruse (1973) et celles de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) ? En conséquence, c'est précisément dans le but de répondre à cette question que nous récapitulerons les conclusions auxquelles nous sommes parvenus dans la première partie de cette thèse, au sujet de la conception classique des théories scientifiques en tant qu'exemple paradigmatique de cadre conceptuel. Cela nous amènera, notamment, à en conclure que les contraintes substantielles – de nature ontologique, épistémologique et cognitive – que nous avons identifiées lorsque nous avons défini ce qu'est un cadre conceptuel, à l'instar de la conception classique des théories scientifiques, sont étroitement liées aux formalismes qui caractérisent cette dernière, en tant qu'approche formelle de la structure et du contenu des théories scientifiques. Il en découle que, afin de répondre à la question de savoir si la conception classique pourrait servir de cadre d'analyse pour reconstruire la théorie synthétique en tant que cadre

conceptuel, nous devons montrer, avant toute chose, en quoi elle pourrait nous aider à reconstruire la théorie synthétique en tant que cadre métathéorique et métalinguistique. Pour ce faire, nous comparerons l'image de la structure de la théorie synthétique qui émerge de l'ouvrage de Ruse (1973) au diagramme à la figure (2), qui illustre l'image de la structure d'une théorie scientifique que l'on peut dégager de la conception classique, dans le but d'identifier dans la première des analogues des concepts primitifs, déduits et empiriques dont parlé Feigl (1970). Ce faisant, nous serons amenés à questionner la manière dont le cadre de la théorie synthétique permet de concevoir les rapports entre génotypes et phénotypes, et donc, par conséquent, les liens que l'on peut établir entre la génétique (mendélienne et des populations) et les autres branches des sciences de la vie qui s'inscrivent dans ce même cadre. Nous en concluons, ainsi, que, afin de trancher la question de savoir s'il

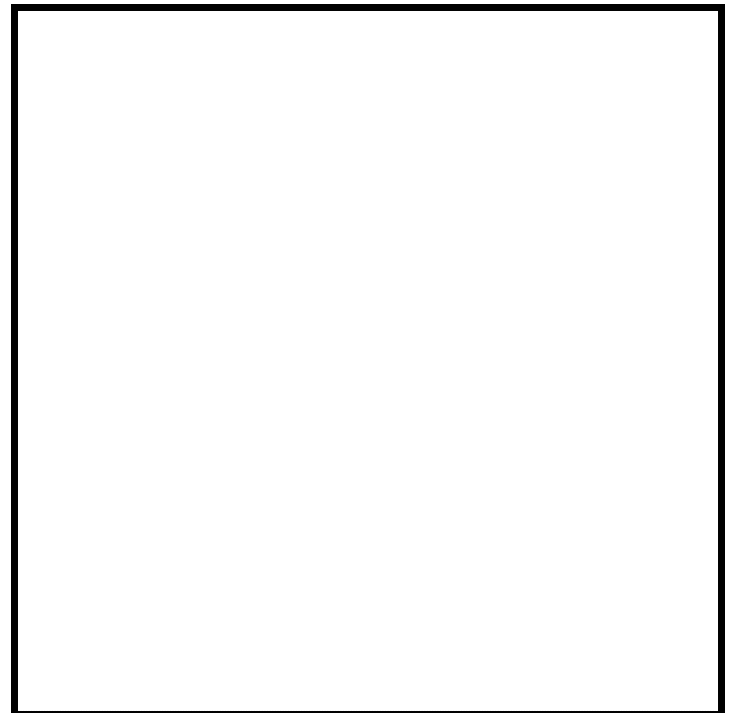


Figure 2 : Diagramme qui représente l'image de la structure des théories scientifiques que présuppose la conception classique (Feigl 1970, p. 6)

serait possible de reconstruire la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel, selon les lignes de la conception classique, il est nécessaire de répondre aux questions suivantes : En quoi les objets que désignent les termes de la génétique mendélienne et de la génétique des populations diffèrent des objets que désignent les termes des autres disciplines qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique ? En quoi les concepts abstraits qui relèvent de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir un réseau de relations formelles entre les concepts qui relèvent, encore une fois, de ces autres disciplines ? Dans quelle mesure les concepts génétiques seraient des concepts ouverts ? Nous en concluons, également, que les contributions que Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) a apportées à la Synthèse Moderne sont particulièrement éclairantes pour répondre à toutes ces questions.

C'est ainsi que, dans un second moment (section 2.2.2), nous prendrons en considération la manière dont ce dernier envisageait, dans une perspective évolutionniste, non seulement les relations entre la génétique et les autres branches des sciences de la vie, mais également celles entre le pouvoir causal des gènes et les propriétés phénotypiques qui font l'objet de la sélection naturelle. Plus précisément, nous nous pencherons sur la manière dont Dobzhansky (1951) s'est servi du concept de « norme de réaction » (« *reaction norm* ») dans le but de caractériser, en termes dynamiques, les

contraintes que les gènes imposent à la sélection naturelle, en déterminant une gamme de phénotypes qui sont susceptibles de se réaliser dans tel ou tel ensemble de conditions environnementales. Pour mieux comprendre la manière dont Dobzhansky (1951, 1970) se servait d'un tel concept, nous en proposerons une formalisation mathématique très simple, en nous inspirant du concept de champ électrique qui est engendré par une charge donnée et qui permet de définir une force électrostatique de Coulomb. Néanmoins, comme Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) envisageait l'évolution comme changement de fréquences géniques ou génotypiques, nous serons amenés à analyser non seulement la manière dont ce dernier conceptualisait l'action du pouvoir des gènes sur la sélection naturelle, mais également celle dont il envisageait l'action de la seconde sur les premiers. Pour ce faire, nous introduirons le concept de « norme adaptative » (« *adaptive norm* »), dont Dobzhansky (1970) se servait dans le but de répondre, justement, à la question de savoir en quoi les différentes valeurs sélectives que manifestent, en fonction des conditions environnementales, les phénotypes qui constituent la norme de réaction de tel ou tel génotype peuvent influencer sur la composition génétique de la population en question, et donc sur ses futures normes de réaction. Plus précisément, en suivant Schmalhausen (1949) et Waddington (1957), Dobzhansky (1970) a utilisé un tel concept pour distinguer différentes formes de sélection naturelle, en les définissant comme autant de manières dont un tel facteur peut modifier la norme adaptative d'une population donnée. En conséquence, ce sont précisément les liens logiques que l'on peut établir entre le concept de norme de réaction et celui de norme adaptative qui nous permettront de caractériser de manière exhaustive la façon dont Dobzhansky (1951, 1970) concevait les relations entre évolution génétique et évolution phénotypique. C'est pourquoi nous nous tournerons encore une fois vers le formalisme de la théorie de l'électromagnétisme afin de formaliser et d'analyser cet autre concept biologique. De cette manière, nous pourrions définir deux champs dynamiques, qui ne sont rien d'autre que le champ qui correspond à la norme de réaction d'un génotype donné, et qui définit, comme réponse, un certain phénotype réalisé, ainsi que le champ qui correspond aux valeurs sélectives que peut prendre tel ou tel phénotype, et qui définit, par conséquent, la norme adaptative que l'on peut associer à un certain phénotype réalisé moyen. À partir d'une telle formalisation, ainsi que sur la base de notre analyse des thèses de Dobzhansky (1951, 1970) et de Ruse (1973), nous pourrions donc émettre l'hypothèse que, lorsqu'elles sont conçues en tant que relations formelles entre ensembles de génotypes et ensembles de phénotypes, les normes de réaction et les normes adaptatives constituent des postulats (ou règles) de correspondance, c'est-à-dire des relations nomologiques entre des termes qui décrivent des entités, des propriétés ou des relations non-observables et des termes qui décrivent des entités, des propriétés ou des relations observables. Il serait donc possible de s'en servir pour doter la théorie synthétique d'une structure logico-syntaxique analogue à celle que Carnap (1956a, 1958) a proposée pour les

théories physiques. En conséquence, c'est sur la base de ces considérations que nous pourrions revenir sur la question de savoir si la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous avons déduite de la conception classique des théories scientifiques s'appliquent effectivement au cas de la théorie synthétique de l'évolution, afin de faire trois constats majeurs. Premièrement, nous montrerons en quoi les objets que désignent les termes de la génétique mendélienne et de la génétique des populations diffèrent des objets que désignent les termes des autres disciplines qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique. Deuxièmement, nous répondrons à la question de savoir en quoi les concepts abstraits qui relèvent de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir un réseau de relations formelles entre les concepts qui relèvent, encore une fois, de ces autres disciplines. Troisièmement, nous montrerons dans quelle mesure les concepts génétiques seraient des concepts ouverts. Nous en concluons, cependant, qu'aucune formalisation de la théorie synthétique ne saurait reléguer la sélection naturelle au rôle de seul facteur causal de l'évolution génotypique. Mais en quoi pourrions-nous amender notre proposition afin de pouvoir rendre compte de cette généralité du principe de sélection naturelle ?

2.2.1 La conception classique des théories scientifiques et la structure logico-syntaxique de la théorie synthétique

En ce qui concerne la première des objections qu'a soulevées Thompson (1989), nous pouvons nous limiter à observer que ce dernier a peut-être sous-estimé les similitudes que l'on peut identifier entre la relation qu'entretiennent le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) et la première loi de Mendel (1866), d'une part, et celle qu'entretiennent la loi de Galilée (1604) et la deuxième loi fondamentale de Newton (1687), d'autre part. Comme nous l'avons évoqué plus haut, Thompson (1989) a affirmé, en effet, que le rôle du principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) consisterait tout simplement à expliciter des informations qui sont déjà contenues, de manière implicite, dans la loi de la ségrégation, et donc non pas à apporter des informations supplémentaires sur la manière dont une telle loi pourrait s'appliquer aux conditions particulières que présuppose ce même principe. Néanmoins, si nous analysons de plus près l'histoire de la formulation du principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), telle que la présente, par exemple, Provine (1971, 2001), nous pouvons émettre l'hypothèse que ce dernier aurait permis d'expliquer un phénomène que la loi de la ségrégation, dans sa forme la plus générale, n'était pas à même d'élucider, c'est-à-dire la persistance, au fil des générations, du génotype hétérozygote dans le *pool* génétique de telle ou telle population, en contradiction avec toute théorie de la réversion au type parental. En cela, il aurait donc joué, relativement à la première loi de Mendel (1866), le même rôle que l'on peut

attribuer à la loi de Galilée (1604) dans son rapport avec la deuxième loi fondamentale de Newton³⁹³. Quant aux deux objections restantes, nous pouvons remarquer, sans rien préjuger de leur bienfondé dans le cas où l'on s'interrogerait sur la validité de l'axiomatisation de Ruse (1973) en tant que reconstruction formelle de la théorie darwinienne de l'évolution en tant que telle, qu'elles sont bien moins pertinentes lorsqu'il s'agit, plus précisément, de juger de la validité d'une telle axiomatisation en tant que reconstruction formelle de la théorie synthétique de l'évolution telle que nous l'avons définie dans le chapitre précédent – c'est-à-dire à la fois comme théorie génétique de l'évolution qui reposerait sur les modèles mathématiques de la génétique (dite « théorique » ou « classique ») des populations et comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie qui serait fondée sur cette même théorie génétique. Comme nous l'avons expliqué plus haut, ces deux critiques portent, en effet, sur la place centrale dans l'étude des phénomènes évolutifs que Ruse (1973) attribuait aux mécanismes génétiques, d'un point de vue ontologique, et à la génétique (mendélienne ou des populations), d'un point de vue épistémologique, ainsi que sur la conception gradualiste et extrapolationniste de la macroévolution qu'impliquait sa stratégie argumentative. De cette manière, tout en mettant en évidence de possibles faiblesses de l'axiomatisation de Ruse (1973), elles soulignent également le fait que les présupposés qui la sous-tendent s'accordent parfaitement avec les deux thèses fondamentales que l'on pourrait considérer comme étant au fondement de la théorie synthétique de l'évolution et qui se résument, comme nous l'avons précédemment évoqué, à ces deux phrases

³⁹³ Plus précisément, comme l'a expliqué Provine (1971, 2001), Mendel (1866) s'était lui-même livré à une analyse des implications mathématiques des lois qui sont aujourd'hui connues sous son nom, et notamment à une analyse de la variation, à la suite d'un certain nombre de fécondations autogames successives, des rapports génotypiques qu'il avait calculés pour une première génération d'hybrides obtenus à partir du croisement de deux lignées pures, *AA* et *aa*. Il avait donc estimé, « en guise de généralisation par essais et erreurs » (« *as a trial and error generalization* »), que les trois génotypes possibles (*AA*, *Aa*, *aa*) se distribuaient, à la *n*-ième génération, selon les rapports $(2^n - 1) AA : 2 Aa : (2^n - 1) aa$, c'est-à-dire que « la continuation des fécondations autogames débouchait clairement sur un retour de plus en plus prononcé aux types parentaux *AA* et *aa*, ainsi que sur la diminution des individus hétérozygotes » (« *continued self-fertilization clearly led to increasing reversion to the parental types AA and aa, and to the decrease of heterozygotes* ») (Provine 1971 ; 2001, p. 131-132). Il en découle que les conséquences de la première loi de Mendel (1866), telles que ce dernier les avait lui-même développées, étaient non seulement différentes de celles qu'en ont déduites Godfrey H. Hardy (1908) et Wilhelm Weinberg (1908) par le biais de leur principe éponyme, mais également diamétralement opposées à ces dernières. En conséquence, c'est précisément pour une telle raison que nous pouvons avancer l'hypothèse que le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) jouerait un rôle fondamental dans l'application de la première loi de Mendel (1866) au cas spécifique que représente le changement de la composition génétique d'une population diploïde qui se reproduit aléatoirement et qui ne subit l'influence d'aucun facteur évolutif, si bien que l'on pourrait en conclure, contre Thompson (1989), que la déduction d'un tel principe à partir de la loi de la ségrégation ne serait pas triviale.

d'Ernst Mayr (1980a, 1998a) : premièrement, « l'évolution graduelle [*gradual evolution*] peut s'expliquer par de petites modifications génétiques ('mutations') [*in terms of small genetic changes ('mutations')*] et par les effets de la recombinaison génétique [*recombination*], ainsi que par l'ordre que la sélection naturelle donne à cette variation génétique [*the ordering of this genetic variation by natural selection*] » ; deuxièmement, « les phénomènes évolutifs observés [*observed evolutionary phenomena*], en particulier les processus macro-évolutifs et la spéciation [*macroevolutionary processes and speciation*], peuvent s'expliquer d'une manière qui est conforme aux mécanismes génétiques connus [*consistent with the known genetic mechanisms*] (Mayr 1980a ; 1998a, p. 1). Nous pouvons donc résumer notre analyse des critiques que Thompson (1989) a adressées à l'axiomatisation de Ruse (1973) au moyen du tableau ci-dessous

	Liens logiques entre la loi de la ségrégation et le principe de Hardy-Weinberg	Lien ontologique et épistémique entre évolution et hérédité	Lien entre macroévolution et microévolution
Critique de Thompson (1989) à l'axiomatisation de Ruse (1973)	Le second se limite à expliciter le contenu de la première	La seconde est un produit de la première, si bien qu'il faut déduire la théorie de l'hérédité de la théorie de l'évolution	L'axiomatisation de Ruse (1973) ne permet pas de prendre en compte les critiques de l'extrapolationnisme
Réponses aux critiques de Thompson (1989) si l'on considère l'axiomatisation de Ruse (1973) comme une formalisation de la théorie synthétique	Le second permet d'étendre la première (cas de la persistance des génotypes hétérozygotes)	L'axiomatisation de Ruse (1973) est cohérente avec l'accent que la Synthèse Moderne met sur les fondements génétiques de l'évolution	L'idée que la macroévolution serait une extrapolation de processus micro-évolutifs fait partie du noyau de la théorie synthétique

Plus généralement, nous pouvons en conclure que la manière dont Ruse (1973) concevait les rapports entre la génétique mendélienne, la génétique des populations et les autres branches des sciences de la vie – dans le contexte de la théorie synthétique – s’accorde avec la vision de l’évolution que prônait Dobzhansky (1951), du moins à partir de 1951. Une telle vision était, en effet, de nature « génétique », au sens où elle mettait l’accent sur le rôle fondamental que jouerait la génétique dans la compréhension de la diversité organique et des phénomènes macro-évolutifs. Dans une telle perspective, la génétique au sens général du terme, en tant qu’étude de la « physiologie de l’hérédité et de la variation » (« *the physiology of inheritance and variation* »), serait donc fondamentale pour comprendre l’évolution. Plus précisément, Dobzhansky (1951) considérait l’évolution comme n’étant rien d’autre que « le développement des différences entre les populations ancestrales et les populations descendantes » (« *the development of dissimilarities between the ancestral and the descendant populations* »), et c’était justement à partir d’une telle conception de l’évolution qu’il pouvait justifier l’importance qu’il accordait à la génétique dans le contexte de sa propre vision de la théorie synthétique, puisque « les mécanismes qui déterminent les similitudes et les différences entre les parents et leur progéniture » (« *the mechanisms which determine the similarities and dissimilarities between parents and offspring* ») font « l’objet » (« *subject matter* ») de cette dernière (Dobzhansky 1951, p. 12). Il faut remarquer, en outre, que Dobzhansky (1951) reconnaissait l’importance de la génétique pour l’évolution à deux niveaux différents, c’est-à-dire à la fois d’un point de vue épistémique et d’un point de vue ontologique. D’un point de vue épistémique, la génétique se distingue d’autres branches des sciences de la nature, telles que la systématique, la morphologie, l’embryologie et la paléontologie, dans la mesure où elle porte directement sur « les mécanismes qui causent l’évolution » (« *the mechanisms that bring about evolution* »), ainsi que sur « des problèmes qui sont de nature causale, plutôt qu’historique, [sur] des phénomènes qui peuvent être étudiés expérimentalement plutôt que [sur] des événements qui se sont produits dans le passé » (« *the mechanisms that bring about evolution, causal rather than historical problems, phenomena that can be studied experimentally rather than events which happened in the past* »). En conséquence, c’est précisément en raison de telles caractéristiques épistémiques que, aux yeux de Dobzhansky (1951), ce serait la génétique, et non pas les autres branches des sciences de la vie, qui constituerait la véritable « héritière des traditions darwiniennes » (« *heir to the Darwinian traditions* ») (Dobzhansky 1951, p. 11-12). D’un point de vue ontologique, Dobzhansky (1951) définissait l’évolution comme consistant non seulement dans le développement de certaines différences phénotypiques entre populations d’organismes apparentés, mais également dans « un changement dans la composition génétique des populations » (« *a change in the genetic composition of populations* »). C’était précisément pour cette raison que Dobzhansky (1951) pouvait en conclure que

« l'étude des mécanismes de l'évolution relève de la » (« *the study of mechanisms of evolution falls within the province of* ») génétique, en général (Dobzhansky 1951, p. 16), et du sous-domaine de la génétique qui traite des processus qui se déroulent au sein des populations d'organismes, c'est-à-dire la génétique des populations, en particulier (Dobzhansky 1951, p. 15). Il s'ensuit que les critiques que Beatty (1980a, 1980b, 1987) et Thompson (1989) ont adressées à l'axiomatisation de Ruse (1973) nous permettent d'en conclure que, malgré sa nature schématique, cette dernière pourrait représenter une candidate prometteuse pour le rôle de formalisation de la théorie synthétique de l'évolution, du moins telle que l'envisageait l'un de ses architectes, c'est-à-dire Theodosius Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970)³⁹⁴. Cela dit, dans quelle mesure pourrions-nous nous servir de l'axiomatisation de Ruse (1973), ainsi que des thèses de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970), dans le but de proposer une formalisation de la théorie synthétique de l'évolution qui soit conforme aux canons de la conception classique des théories scientifiques ?

Afin de répondre à cette question, nous devons aborder, précisément, le problème de savoir dans quelle mesure la conception classique des théories scientifiques s'applique à la théorie synthétique de l'évolution. Comme nous l'avons expliqué dans la première partie de cette thèse, la conception classique, du moins telle que l'a développée Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) constitue, avant tout, un cadre métalinguistique et métathéorique pour l'analyse et la reconstruction rationnelle du savoir scientifique. En tant que telle, elle se compose de deux volets complémentaires. Le premier de ces deux volets n'est rien d'autre qu'une métathéorie syntaxique dont la fonction consiste à déterminer la manière dont on pourrait reconstruire telle ou telle théorie scientifique sous la forme d'un système axiomatique, **TC**, d'énoncés où figurent deux sortes de termes : d'une part, des termes descriptifs (c'est-à-dire qui ne sont pas de nature logico-mathématique), dits « observationnels », qui dénotent des concepts empiriques et qui se définissent de manière opérationnelle, c'est-à-dire par l'intermédiaire d'observations ou d'expériences

³⁹⁴ Comme l'a remarqué Niles Eldredge (1985b), si l'on analyse de près *Genetics and the Origin of Species*, de Dobzhansky (1937, 1941), et *Systematics and the Origin of Species*, de Mayr (1942), l'on peut se rendre compte du fait que leurs auteurs respectifs portaient deux regards très différents sur la nature des rapports entre l'évolution génétique et l'évolution phénotypique : « Alors que Dobzhansky (1937, 1941) partait de 'la physiologie du gène' [*the physiology of the gene*] et remontait jusqu'aux phénomènes qui concernent les espèces et (dans une moindre mesure) ceux qui concernent les rapports entre les espèces [*species and (to a lesser extent) among-species phenomena*], en passant par les populations, Mayr s'intéresse avant tout, dans son livre, à l'anatomie interne des espèces [*the internal anatomy of species*], en partant du point de vue des 'caractères' taxonomiques [*from the vantage point of the 'characters' of taxonomy*] – autrement dit, du point de vue du phénotype [*in other words, from the standpoint of the phenotype*]. Après tout, c'est par le phénotype qu'agit la sélection naturelle pour modifier la composition génétique des populations » (Eldredge 1985b, p. 44).

empiriques ; d'autre part, des termes descriptifs, dits « théoriques », qui dénotent des concepts abstraits, c'est-à-dire des concepts qui forment le corps de la théorie proprement dite, notamment lorsqu'elle est reconstruite sous la forme d'un réseau d'axiomes et de théorèmes. Pour reprendre, encore une fois, la terminologie de Feigl (1970), il s'agit soit de concepts primitifs qui sont généralement définis, de manière implicite, par les axiomes de la théorie, soit de concepts dits « déduits », ou « définis », c'est-à-dire de concepts que l'on peut définir, en partie, par le biais de ces mêmes axiomes et, en partie, au moyen de la classe des termes observationnels auxquels ils sont reliés par des règles de correspondance. Comme nous l'avons précédemment évoqué, les termes observationnels relèvent d'un (sous)langage formel, L_O , que le volet syntaxique de la conception classique des théories scientifiques décrit comme étant nominaliste, finitiste, constructiviste, extensionnel et complètement interprété de manière opérationnelle. Cela signifie qu'un tel langage formel possède des caractéristiques syntaxiques qui en font, justement, un langage observationnel, c'est-à-dire un langage qui se compose de termes dont on peut supposer qu'ils désignent directement des objets, des propriétés ou des relations empiriques. En tant que langage observationnel, L_O , s'oppose, par conséquent, au langage dont relèvent les termes théoriques, c'est-à-dire L_T . Telle que la présentait, encore une fois, Carnap (1956, 1958 ; Psillos & Carnap 2000), la structure syntaxique de cet autre langage formel se compose, en effet, de deux sous-structures fondamentales : d'une part, elle se compose d'une sous-structure proprement mathématique qui prend la forme d'une « théorie des types dite 'simple' » (Church 1940) ; d'autre part, elle se compose également d'une autre sous-structure, qui est fondée sur la première et qui consiste dans un ensemble de « schémas conceptuels généraux » (Carnap 1958), c'est-à-dire de variables et de fonctions propositionnelles d'ordre supérieur au premier, qui ne sont rien d'autre que les termes théoriques qui figurent dans la théorie en question. Contrairement aux termes de L_O , ces derniers désignent des « constructions syntaxiques » (Nagel 1950 ; Psillos 1999) qui ne représentent rien d'autre qu'une manière de prolonger les représentations d'entités, de propriétés et de relations directement observables en construisant des « quasi-objets » logico-mathématiques – tels les nombres, les classes de nombres, les classes de classes de nombres, etc. – auxquels on peut attribuer, en dernière instance, une signification empirique, par l'intermédiaire de règles sémantiques d'une nature particulière. Il en découle que cette autre sous-structure syntaxique du langage L_T forme le noyau logique de toute théorie qui est reconstruite sous la forme d'un système axiomatique, en ceci qu'elle permet non seulement de faire le lien entre les composantes mathématiques d'une théorie scientifique et ses composantes proprement théoriques, mais également de mettre en relation les termes théoriques avec les termes observationnels. En conséquence, comme nous l'avons déjà expliqué dans la première partie de cette thèse, c'est précisément sur une telle description de la structure syntaxique des théories

scientifiques que repose le second volet de la conception classique en tant que cadre métalinguistique et métathéorique. Ce second volet de la conception classique consiste dans une métathéorie sémantique, et plus précisément dans une théorie de l'interprétation partielle du langage formel que constituent les deux (sous)langages L_O et L_T que l'on pourrait qualifier de « méthodologique » ou d'« épistémologique ». Une telle métathéorie se résume, en effet, à une explicitation des conditions (logiques) qui permettent de déterminer si tel ou tel terme du langage L_T que l'on peut associer à une certaine théorie scientifique permet – en conjonction avec tel ou tel postulat théorique (T), avec tel ou tel postulat de correspondance (C) ou avec d'autres termes théoriques – de déduire des conséquences empiriques, c'est-à-dire des conséquences logiques qui sont exprimables sous la forme d'énoncés qui ne contiennent que des termes du langage observationnel correspondant, qui découlent de la théorie où il figure et que l'on ne pourrait plus dériver s'il était remplacé par un autre terme. Nous avons donc pu en conclure que c'est à partir d'une telle définition de la structure d'une théorie scientifique, reconstruite sous la forme d'un système axiomatique, et du système d'interprétation correspondant que Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) a fini par développer une interprétation de la conception classique que nous avons qualifiée de « dichotomique », en ceci qu'elle visait à sauver la distinction entre les composantes analytiques d'une théorie donnée et ses composantes analytiques, et de « structuraliste ».

Ces mêmes considérations nous ont donc permis de formuler, en outre, une définition de la notion de cadre conceptuel, qui est elle-même « structuraliste » et qui se résume de la manière suivante. D'après cette définition, un cadre conceptuel ne serait donc rien d'autre qu'un cadre métalinguistique et métathéorique particulier, dont on pourrait se servir pour reconstruire formellement telle ou telle théorie scientifique en imposant à cette dernière des contraintes qui ne seraient pas seulement de nature formelle, mais également de nature substantielle, en ceci qu'elles concerneraient la substance même de la théorie en question, à savoir l'architecture conceptuelle qui la structure et le contenu empirique qui la caractérise. Plus précisément, il s'agirait de trois types de contraintes bien distincts. Premièrement, nous pouvons identifier des contraintes de nature ontologique qui auraient trait aux différences essentielles qui existeraient entre les portées ontologiques respectives des termes (descriptifs) théoriques et des termes (descriptifs) observationnels. Les contraintes de ce premier type se résumeraient, ainsi, au principe d'après lequel les termes théoriques rempliraient une fonction essentiellement inférentielle, si bien qu'on pourrait les considérer comme étant de simples outils logiques permettant d'organiser les connaissances empiriques qu'expriment les termes observationnels, dont la fonction consisterait, en revanche, à représenter des objets, des propriétés et des relations dont l'existence effective est vérifiable de manière (du moins comparativement) élémentaire. En conséquence, il serait toujours possible – du moins en droit – de remplacer les

premiers par des constantes logiques sémantiquement indéterminées, alors que les seconds ne se laisseraient formaliser que par l'intermédiaire de constantes descriptives sémantiquement déterminées. Deuxièmement, l'exemple paradigmatique que constitue la conception classique des théories scientifiques nous permet également d'en inférer un ensemble de contraintes qui sont de nature épistémologique, dans la mesure où elles auraient trait à la possibilité de réduire l'architecture de concepts qui caractérise telle ou telle théorie à une structure, définie comme étant un réseau de relations formelles entre des termes qui désignent des contenus observationnels (Demopoulos 2013c). Plus précisément, nous pouvons résumer toutes ces contraintes à un seul et unique principe, que nous avons qualifié de « contrainte de symétrie inférentielle », dans la mesure où il consiste à affirmer qu'il n'existerait aucune différence essentielle entre explications, d'une part, et prédictions ou post-dictions, d'autre part. Dans les deux cas, il s'agirait, en effet, d'inférences que l'on pourrait tirer à partir de la conjonction de postulats **TC** qui sert, dans le cadre de la conception classique des théories scientifiques, à représenter les aspects formels de la structure et du contenu d'une théorie donnée. Il en découle que cette contrainte nous permet de considérer telle ou telle théorie scientifique comme étant un simple outil d'inférence, et donc comme étant réductible à une structure, précisément dans le sens du terme que nous venons de préciser. Troisièmement, nous pouvons identifier un dernier ensemble de contraintes, qui seraient de nature cognitive, puisqu'elles toucheraient à la nature spécifique des concepts qui relèvent des sciences empiriques, par opposition aux concepts qui relèvent des sciences formelles. De telles contraintes consistent, en effet, à affirmer que les seconds ne désigneraient pas des entités ou des processus physiques, mais des entités qui seraient de nature purement logico-mathématique, c'est-à-dire des entités qui ne seraient – d'après la conception des objets mathématiques que Carnap (1939, 1956a, 1958) a empruntée à Wittgenstein (1922) – rien d'autre que des « quasi-objets », que l'on pourrait donc réduire à des constructions syntaxiques et entièrement formalisables d'un point de vue logique. Par conséquent, dans le cadre de la conception classique telle qu'elle a été interprétée par Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), les concepts qui relèvent des sciences formelles se distingueraient de ceux qui relèvent des sciences empiriques en ceci que ces derniers, désigneraient des entités, des propriétés et de relations physiques, dont personne ne saurait fournir une définition logique complète et définitive. Il en découle que les premiers seraient des concepts, pour ainsi dire, « fermés », alors que les seconds seraient des concepts, pour ainsi dire, « ouverts ». De telles contraintes sont donc étroitement liées au formalisme, ou plus précisément aux différents formalismes (Carnap 1961a ; Psillos & Carnap 2000), que l'on peut associer à la conception classique des théories scientifiques, si bien que l'aspect linguistique et formelle de cette dernière finit par s'avérer indissociable de son aspect, pour ainsi dire, « substantiel ». Autrement dit, la définition structuraliste de ce qui constitue un cadre conceptuel que nous pouvons

déduire de la conception classique des théories scientifiques est intrinsèquement liée à la conception classique en tant qu'approche formelle des structures et des contenus des théories scientifiques.

Cela nous amène, par conséquent, à nous poser la question de savoir en quoi la conception classique des théories scientifiques pourrait représenter un outil pertinent non seulement pour identifier les contraintes qui nous permettraient de définir la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel, mais également pour en formaliser la structure et le contenu sous la forme d'un cadre métathéorique et métalinguistique. Pour ce faire, nous pouvons partir de l'axiomatisation qui a été proposée par Ruse (1973), en comparant, notamment, l'image de la structure des théories scientifiques qu'implique la conception classique – qui est représentée par le diagramme à la figure (2) – et le diagramme qui représente la structure de la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, telle que la concevait Ruse (1973) lui-même – que nous pouvons observer à la figure (16). Ce faisant, nous pouvons reconstruire l'image de la structure de la théorie synthétique qui émerge de notre analyse des arguments de Ruse (1973) au moyen du diagramme à la figure (20). Plus précisément, nous pouvons reprendre à notre frais la représentation hiérarchique des liens logiques existant entre la théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle qui formerait le noyau théorique de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel, c'est-à-dire la génétique (théorique) des populations, et les autres branches des sciences de la vie qui sous-tend le diagramme de Ruse (1973). Autrement dit, nous pouvons envisager ces mêmes liens comme étant des relations entre des concepts (théoriques) primitifs, des concepts (théoriques) déduits et des concepts empiriques dont la fonction

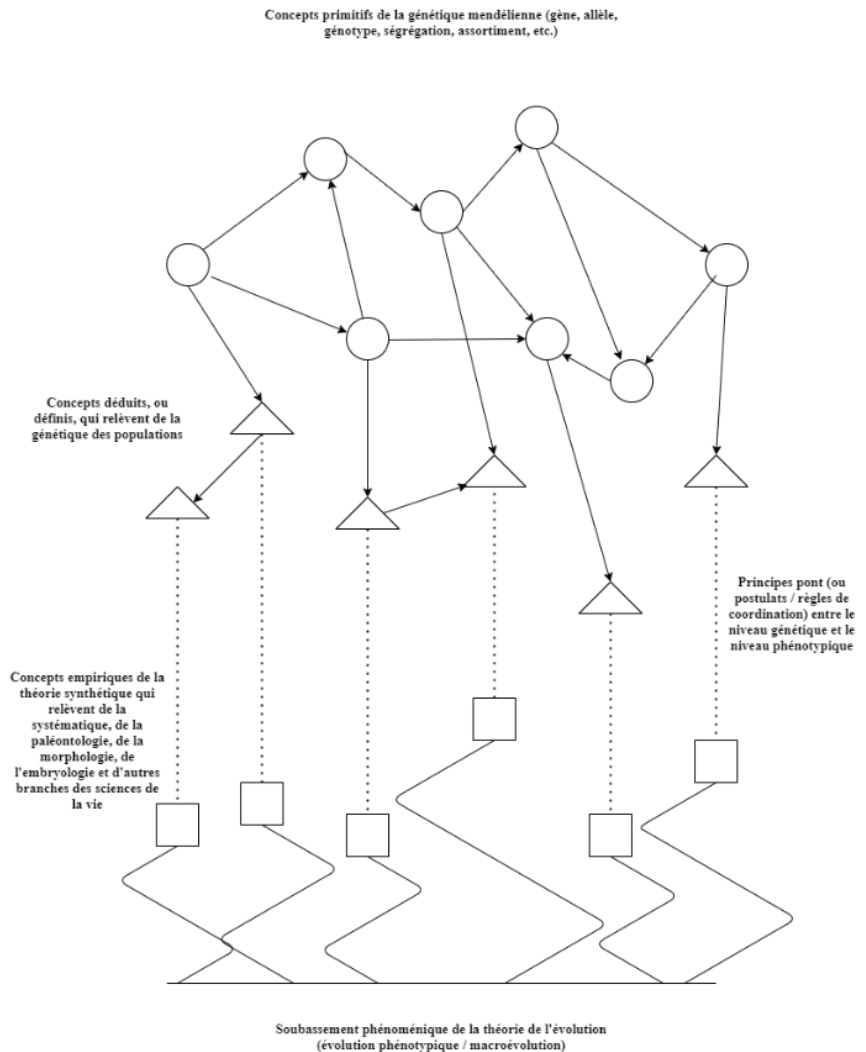


Figure 20 : Diagramme qui représente la structure de la théorie synthétique de l'évolution telle qu'on peut l'envisager sur la base des arguments de Ruse (1973)

analyse des arguments de Ruse (1973) au moyen du diagramme à la figure (20). Plus précisément, nous pouvons reprendre à notre frais la représentation hiérarchique des liens logiques existant entre la théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle qui formerait le noyau théorique de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel, c'est-à-dire la génétique (théorique) des populations, et les autres branches des sciences de la vie qui sous-tend le diagramme de Ruse (1973). Autrement dit, nous pouvons envisager ces mêmes liens comme étant des relations entre des concepts (théoriques) primitifs, des concepts (théoriques) déduits et des concepts empiriques dont la fonction

consiste à ancrer le noyau théorique de la théorie synthétique à son soubassement phénoménique. Dans une telle visualisation de la structure de la théorie synthétique de l'évolution, les concepts primitifs qui sont représentés par les ronds (○) correspondent aux concepts fondamentaux qui sont implicitement définis par les lois de Mendel (1866) – du moins telles que les présentait Ruse (1973) lui-même. Ces lois permettent, en effet, de définir implicitement le concept de « gène mendélien » (« *Mendelian gene* ») (Ruse 1973, p. 12) en tant qu'unité héréditaire – ou, plus précisément, en tant qu'« unité génétique de ségrégation que l'on peut identifier par le biais de différences phénotypiques qui sont associées à la présence d'allèles différents à un seul et même *locus* » (« *segregating genetic unit which is detected through phenotypic differences associated with different alleles at the same locus* ») (Orgogozo, Peluffo & Morizot 2016)³⁹⁵. Elles permettent, en outre, de définir, de manière implicite ou explicite, d'autres concepts qui jouent un rôle fondamental pour l'étude des bases génétiques de l'évolution, tels les concepts d'« allélomorphe », ou « allèle », d'« homozygote », d'« hétérozygote », etc. (Gayon 2016)³⁹⁶, ainsi que de formuler les relations logiques que l'on peut établir entre ces mêmes concepts d'une manière suffisamment simple et précise pour qu'ils puissent constituer un « corps théorique mathématique » (« *a body of mathematical theory* ») (Rice 2004, p. 2)³⁹⁷. À partir de ces concepts primitifs, l'on peut donc déduire des concepts définis, qui sont

³⁹⁵ Au sujet du concept de « gène » dans le cadre de la génétique mendélienne, voir également Falk (1984), Fox Keller (2000), Gilbert (2000), Stern (2000), Moss (2003), Weber (2005), Pradeu (2015), Griffiths et Stotz (2013), Gayon (2016), Morange (2016), ainsi que Rheinberger et Müller-Wille (2017).

³⁹⁶ Comme l'a rappelé, néanmoins, Jean Gayon (2016), ces concepts, ainsi que les termes techniques correspondants, n'ont pas été introduits par Mendel (1866) lui-même, mais par William Bateson (1902). Ces termes « impliquent l'idée que chaque individu possède deux (et exactement deux) versions physiques du même élément héréditaire [*'two (and exactly two) physical versions of the same hereditary element'*] pour tel ou tel caractère phénotypique qui est transmis de manière mendélienne [*'for a given character transmitted in a Mendelian way'*] – une idée que Mendel n'avait jamais suggérée » (Gayon 2016, p. 226).

³⁹⁷ Pour montrer cela, Sean Rice (2004) a comparé le modèle mendélien des patrons de transmission héréditaire à celui qu'avait postulé Francis Galton (1898), en se concentrant sur la manière dont ces deux modèles permettent de représenter les facteurs qui déterminent la composition génétique d'un individu donné. Notamment, alors que le modèle mendélien permet de représenter la composition d'un individu donné comme étant le reflet de la composition, au moment présent, du *pool* génétique de la population à laquelle il appartient, le modèle que proposait Galton (1898) « postulait que la composition héréditaire d'un individu est une combinaison de contributions distinctes émanant des parents, des grands-parents et de tous les ancêtres de l'individu en question, dont chacune saute les générations intermédiaires » (« *posited that an individual's inherited makeup is a combination of separate contributions from parents, grandparents, and all of the individual's ancestors, each skipping over intervening generations* ») (Rice 2004, p. 2). Rice (2004) en a donc conclu que, si l'hypothèse de Galton (1898) s'était avérée juste, la génétique des populations (en tant que théorie génétique de l'évolution) n'aurait jamais pu se construire en tant que « science théorique » (« *theoretical science* ») c'est-à-dire en tant que corps de connaissances qui repose sur deux piliers fondamentaux : « un ensemble de règles empiriques bien établies

représentés par des triangles (Δ) et qui correspondent, très schématiquement, aux concepts fondamentaux de la génétique (théorique) des populations, et notamment aux concepts qui sont définis par la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908). Comme nous l'avons vu plus haut, cette loi n'est, en effet, rien d'autre que la caractérisation d'une population modèle qui consiste essentiellement dans un système de fréquences génotypiques (ou de fréquences alléliques) qui évoluent dans le temps, en conformité avec les présupposés qui fondent la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) elle-même. Plus précisément, en tant que conséquence logique des lois de Mendel (1866) qui s'applique au cas d'« un seul et même *locus* biallélique dans une population qui se reproduit aléatoirement » (Provine 1971 ; 2001, p. 132), la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1980) permet de définir le concept de « *pool* génétique » (« *gene pool* ») comme étant « la somme totale de tous les allèles qui sont présents dans les membres reproducteurs d'une population à un moment donné » (« *the sum total of all alleles in the breeding members of a population at a given time* ») (Griffiths *et al.* 2015, p. 672), et donc comme étant l'ensemble (ou le système) des fréquences génotypiques, ou alléliques, qui constituent la composition génétique de la population en question à ce même moment. À son tour, la notion de *pool* génétique pose les fondements de la définition d'un autre concept qui est essentiel non seulement pour la génétique des populations, mais également pour la théorie (synthétique) de l'évolution dans son ensemble, c'est-à-dire le concept de « population mendélienne » (« *Mendelian population* ») en tant que communauté reproductrice d'individus sexués qui se croisent entre eux et qui partagent, justement, un seul et même *pool* génétique (Dobzhansky 1950, p. 405). Il en découle que les relations conceptuelles que l'on peut établir entre les lois de Mendel (1866) et la loi de Hardy-Weinberg (1908 ; 1908), en suivant les arguments de Ruse (1973), nous permettent de justifier l'architecture conceptuelle que présuppose le diagramme que nous avons tracé à la figure (20), du moins en ce qui concerne son volet supérieur. De plus, si nous suivons ces mêmes arguments jusqu'au bout, nous pouvons également identifier les concepts empiriques qui sont supposés ancrer le corps conceptuel de la théorie synthétique, reconstruite sous la forme de système axiomatique, à son domaine phénoménique d'application, c'est-à-dire le domaine de tous les phénomènes évolutifs (aussi bien au niveau micro-évolutif qu'au niveau macro-évolutif). Il s'agit, notamment, de concepts qui relèvent des différentes disciplines qui

qui s'appliquent à une grande variété de systèmes » (« *a set of well-understood empirical rules that apply to a wide range of systems* »), d'une part, et « un ensemble de théorèmes mathématiques que l'on peut déduire de principes clairs et qui s'appliquent précisément à un ensemble bien défini de systèmes » (« *a set of mathematical theorems derived from unambiguous principles, that apply exactly to a well-defined set of systems* »), d'autre part (Rice 2004, p. 2). La raison en serait, précisément, que les règles empiriques qu'impliquait le modèle de Galton (1898) ne se prêtaient pas à une formulation mathématique simple.

s'inscrivent dans le cadre conceptuel de la théorie synthétique et qui sont fédérées autour du noyau conceptuel que représente le système axiomatique de la génétique mendélienne et de la génétique des populations, tels que, comme nous l'avons vu plus haut, le concept d'effet du fondateur ou de radiation adaptative. Cela dit, en quoi pourrions-nous considérer que de tels concepts seraient, effectivement, des concepts empiriques ? Et en quoi consisteraient les principes pont, ou les règles de coordination, qui reliaient les concepts empiriques de ces différentes branches des sciences de la vie aux concepts de la génétique mendélienne et de la génétique des populations ?

Ces deux questions sont capitales pour comprendre en quoi le modèle que représente la conception classique des théories scientifiques, aussi bien comme cadre métalinguistique et métathéorique que comme cadre conceptuel, pourrait s'appliquer au cas de la théorie synthétique de l'évolution. En effet, ce sont précisément les liens logiques que l'on peut établir entre les concepts, plus abstraits, qui structurent une théorie donnée et ceux qui en forment les fondements empiriques, de même que, par conséquent, les liens logiques que l'on peut établir entre les termes (théoriques) qui dénotent les premiers et les termes (observationnels) qui dénotent les seconds, qui servent de trait d'union entre le volet syntaxique de la conception classique et son volet sémantique. En outre, ce sont ces mêmes liens qui nous permettent de nous servir des caractéristiques que possède la conception classique des théories scientifiques, en tant que cadre métalinguistique et métathéorique, pour en déduire les types de contraintes qu'une telle conception impose aux théories qui sont reconstruites à son instar, c'est-à-dire les contraintes qui en font un cadre conceptuel, d'après la manière dont nous avons défini une telle notion dans la première partie de cette thèse. Plus précisément, c'est justement parce que le langage formel dont la conception classique préconise l'usage, dans le but de formaliser une théorie donnée, se compose d'un sous-langage observationnel, L_O , et d'un sous-langage théorique, L_T , qu'il est nécessaire d'identifier un critère qui permette d'attribuer une signification aux termes et aux expressions du second, en fonction des termes et des expressions du premier. Comme nous l'avons vu plus haut, Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) envisageait un tel critère comme étant de nature méthodologique ou épistémologique, c'est-à-dire comme étant un critère qui tiendrait à la manière dont les termes et les expressions de L_T servent de schémas conceptuels dont la fonction consiste à systématiser, inductivement ou déductivement (Hempel 1954, 1965), les connaissances empiriques que l'on peut exprimer au moyen du langage L_O . Par conséquent, c'est précisément en cela que consiste le lien que l'on peut établir entre le volet syntaxique de la conception classique, en tant que cadre métalinguistique et métathéorique, et son volet sémantique. De plus, c'est toujours la dichotomie entre termes théoriques et termes observationnels qui est au fondement des trois types de contraintes substantielles que nous avons identifiés dans la conception classique en tant que cadre conceptuel. Plus précisément, c'est la dichotomie formelle entre termes

observationnels et termes théoriques qui permet d'établir trois autres dichotomies qui sont, justement, de nature substantielle : premièrement, la dichotomie ontologique qui existe entre les objets que désignent les termes observationnels et les objets que désignent les termes théoriques ; deuxièmement, la dichotomie de nature épistémologique que l'on peut identifier entre la fonction des concepts que dénotent les termes observationnels, qui servent à exprimer des contenus empiriques, et la fonction des concepts que dénotent les termes théoriques, qui consiste à établir des relations formelles entre ces mêmes contenus empiriques ; troisièmement, la dichotomie de nature cognitive qui existe entre les concepts abstraits des sciences empiriques et les concepts logico-mathématiques, dans la mesure où les seconds se laissent définir de manière définitive et exhaustive, alors que les premiers sont doués d'un contenu observationnel qui est nécessairement incomplet et qui change au gré de l'avancement de notre connaissance empirique du monde.

Il en découle que, si nous voulons appliquer la définition de la notion de cadre conceptuel que nous avons déduite de la conception classique des théories scientifiques au cas de la théorie synthétique de l'évolution, nous devons montrer, avant tout, en quoi il serait possible d'exprimer les concepts empiriques et les concepts plus abstraits (primitifs ou déduits) de la théorie synthétique tels que nous venons de les définir, respectivement, par le biais des termes d'un langage observationnel, L_O , et par l'intermédiaire des termes d'un langage théorique, L_T . Cela signifie que nous devons nous poser la question de savoir si le langage mathématisé de la génétique (théorique) des populations pourrait jouer le rôle de langage théorique, et donc de savoir s'il serait possible de définir les termes qui relèvent de ce même langage par rapport à des termes qui relèvent de disciplines telles que la systématique, la paléontologie, etc. (le terme « radiation adaptative » et « effet du fondateur » en sont, justement, un exemple), et par l'intermédiaire d'un ensemble de règles formelles. Plus précisément, nous devons montrer en quoi la signification, pour ainsi dire « biologique », des termes qui relèvent du langage de la génétique des populations consisterait en ceci qu'ils permettent de systématiser les connaissances empiriques qu'expriment les termes des autres branches des sciences de la vie. Par la suite, nous devons également répondre à la question de savoir en quoi cette première dichotomie, de nature formelle, entre les termes théoriques de la génétique des populations et les termes observationnels des autres branches des sciences de la vie pourrait impliquer des dichotomies substantielles telles que celles que nous venons de décrire. Faire cela signifie, néanmoins, affronter les problèmes suivants : En quoi les objets que désignent les termes de la génétique mendélienne et de la génétique des populations diffèrent des objets que désignent les termes des autres disciplines qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique ? En quoi les concepts abstraits qui relèvent de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir un réseau de relations formelles entre les concepts qui relèvent, encore une fois, de ces autres disciplines ? Dans

quelle mesure les concepts génétiques seraient des concepts ouverts ? C'est précisément afin de répondre à ces autres questions que nous pouvons prendre en considération la manière dont Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) envisageait la théorie synthétique de l'évolution, d'un point de vue génétique, en confrontant les thèse que défendait ce dernier avec la vision de la théorie synthétique qu'implique l'axiomatisation de Ruse (1973). En effet, la façon dont ce dernier s'est approprié le modèle du paysage adaptatif de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) afin de l'appliquer aussi bien au niveau génotypique qu'au niveau phénotypique nous fournit un exemple de la manière dont on pourrait formaliser les liens que l'on peut établir, dans le cadre de la théorie synthétique de l'évolution, entre les concepts et les termes de la génétique des populations – dont relève, justement, le modèle de Wright (1931a, 1931b, 1932) – et les concepts et les termes d'une discipline telle que la systématique ou la paléontologie. Mais quelles sont donc les conséquences qui découlent de la conception des relations entre la génétique et les autres branches des sciences de la vie que défendait Dobzhansky (1951, 1970), conformément à sa propre interprétation de la Synthèse Moderne ?

2.2.2 Normes de réaction et normes adaptatives : la théorie synthétique comme cadre conceptuel « génocentrique » ?

Comme première chose, nous pouvons remarquer que, dans *Genetics and the Origin of Species* – et notamment dans la troisième édition de cet ouvrage, ainsi que dans la quatrième, fortement révisée et intitulée « *Genetics of the Evolutionary Process* » (« *La Génétique du processus évolutif* ») (Dobzhansky 1970) – Dobzhansky (1951, 1970) aborde explicitement aussi bien la question de la distinction entre génotype et phénotype que celle de leurs relations mutuelles. Plus précisément, il définissait le phénotype et le génotype d'un individu donné comme étant, respectivement, « ce qui est perçu par l'observation : la structure et la fonction de l'organisme » (« *what is perceived by observation : the organism's structure and function* ») et « la somme totale du matériel héréditaire qu'un individu reçoit de ses parents et d'autres ancêtres » (« *the sum total of the hereditary material received by an individual from its parents and other ancestors* ») (Dobzhansky 1970, p. 31-32). Quant aux relations entre les génotypes et les phénotypes, nous pouvons affirmer que Dobzhansky (1951, 1970) les comprenait en termes dynamiques. À son avis, le développement ne consisterait pas dans un processus causal unique – c'est-à-dire dans la « superposition des contributions indépendantes » (« *superposition of [the] independent contributions* ») (Dobzhansky 1970, p. 35) de gènes individuels – mais serait le produit d'un réseau dynamique de processus interdépendants. Bien que « les produits des gènes [y] jouent ... le rôle principal » (« *the gene products play...the leading role* »), un tel réseau doit être considéré, en tant que tel, comme étant « intégré dans des systèmes harmonieux qui ont la

capacité de rester en vie » (« *integrated into harmonious systems capable of being alive* ») (Dobzhansky 1970, p. 35). En conséquence, Dobzhansky (1951) estimait que le développement, en tant que processus biologique, consisterait dans le déploiement de ce qu'on pourrait appeler un « champ dynamique accidenté », sur le modèle d'un paysage adaptatif, dans lequel les pouvoirs causaux des différents gènes interagissent les uns avec les autres et provoquent, par ce même biais, des effets épistatiques. Cela dit, de quelle manière Dobzhansky (1951, 1970) concevait-il les pouvoirs causaux des gènes en matière de développement ? En quoi envisageait-il le processus de développement biologique comme étant un champ dynamique accidenté ? La réponse à ces deux questions réside dans le concept de « norme de réaction » (Dobzhansky 1951, 1970) d'un génotype donné, dont Dobzhansky (1951, 1970) se servait, précisément, dans le but de caractériser la manière dont les gènes agissent sur les traits phénotypiques. Bien qu'un gène puisse donner lieu à un seul et unique produit primaire (c'est-à-dire à une seule et unique séquence d'acides aminés), le phénotype adulte de tout individu est, en dernière instance, le produit final d'une série de processus développementaux complexes. C'est pourquoi l'action primaire uniforme d'un seul et même gène peut donner lieu à « une variété de manifestations dans le phénotype en développement » (« *a variety of manifestations in the developing phenotype* ») (Dobzhansky 1970, p. 33). Il s'ensuit que, dans une telle perspective, il serait nécessaire d'envisager la relation causale que l'on peut établir entre un génotype et le phénotype correspondant comme étant non pas une relation biunivoque entre un ensemble de gènes et un ensemble de caractères, mais une relation de « un-à-plusieurs » entre un génotype donné et une certaine gamme de caractères, qui en définissent, justement, la « norme de réaction »³⁹⁸. Parmi tous les phénotypes qui peuvent faire partie de la norme de réaction d'un

³⁹⁸ Comme l'a expliqué Sahotra Sarkar (1999), le terme « norme de réaction » (« *norms of reaction* », « *Reaktionsnorme* ») a été introduit, en 1909, par le biologiste allemand Richard Woltereck (1909) dans le but de « soutenir le point de vue darwinien selon lequel l'évolution s'est produite par l'action de la sélection naturelle sur de petites variations continues » (« *support the Darwinian view that evolution occurred through natural selection acting on small continuous variations* »), en se basant sur ses recherches au sujet des crustacés des genre *Daphnia* et *Hyalodaphnia* (Sarkar 1999, p. 235). Plus précisément, ayant observé que certains traits des organismes qu'il avait étudiés variaient, de manière continue, d'une lignée pure à l'autre parce que « la réponse du phénotype au même changement environnemental n'était pas identique dans les différentes lignées » (« *the response of the phenotype to the same environmental change was not identical in different pure lines* »), Woltereck (1909) traça des « courbes phénotypiques » (« *phenotype curves* ») afin de représenter un tel phénomène (Sarkar 1999, p. 235). Comme de telles courbes changeaient à chaque variable environnementale supplémentaire que l'on prenait en considération, « il y en avait donc un nombre qui était, potentiellement, quasiment infini et Woltereck a forgé le terme '*Reaktionsnorm*' pour indiquer la totalité des relations qu'elles incarnent » (« *there were thus potentially an almost infinite number of them and Woltereck coined the term '*Reaktionsnorm*' to indicate the totality of the relationships embodied in them* ») (Sarkar 1999, p. 236). Quant à Dobzhansky (1951, 1970), il avait commencé à utiliser un tel concept au cours des années 1920, dans le contexte de la

génotype donné, seul l'un d'entre eux sera finalement réalisé « chez un individu donné à un certain stade de son développement » (« *in a given individual at a certain stage of his development* ») et un tel résultat ne dépendra pas du pouvoir causal des gènes, mais seulement de « la séquence des environnements dans lesquels se déroule le processus développemental » (« *the sequence of environments in which the development takes place* ») (Dobzhansky 1970, p. 33). En d'autres termes, nous pouvons en conclure que, aux yeux de Dobzhansky (1951, 1970), le pouvoir causal des gènes qui constituent le génotype d'un individu donné ne consisterait pas à déterminer un phénotype unique, en tant que seul et unique résultat possible d'un processus développemental donné, mais à contraindre la latitude de variation dont jouit le phénotype en question, au gré des variations des conditions environnementales. C'est précisément pour une telle raison que nous pouvons envisager le processus de développement biologique, tel que le présentait Dobzhansky (1951, 1970), comme constituant un champ dynamique accidenté qui serait engendré par le pouvoir de contrainte qu'exerceraient les gènes sur l'ensemble des caractères phénotypiques qui peuvent se former au cours d'un tel processus. Cependant, comment pourrait-on mieux caractériser un tel pouvoir de contrainte ?

Afin de comprendre la manière dont Dobzhansky (1951, 1970) lui-même envisageait un tel pouvoir des gènes, nous devons réinterpréter la façon dont ce dernier concevait les rapports entre les gènes et les normes de réaction qui y sont associées. Pour ce faire, nous pouvons en proposer une formalisation mathématique élémentaire. Plus précisément, nous pouvons avancer l'hypothèse que, du point de vue de Dobzhansky (1951, 1970), les génotypes engendreraient des champs dynamiques qui ressembleraient aux champs dynamiques qu'engendrent des charges électriques. Si l'on considère, en effet, deux charges électriques, q_1 et q_2 , situées respectivement aux points P et R d'un espace donné, on peut se servir de la loi de Coulomb pour en déduire que leurs interactions mutuelles vont engendrer une certaine force F , telle que

controverse qui avait opposé les mendéliens soviétiques aux tenants de l'hérédité des caractères acquis. Plus précisément, « en 1926, Dobzhansky faisait valoir que ce qui était hérité n'était pas un trait phénotypique mais une norme de réaction [*'what was inherited was not a trait but an NOR'*]. En ce qui concerne la mutation '*Abdomen anormalis*' chez la *Drosophila funebris*, Dobzhansky soulignait que le phénotype mutant n'apparaissait pas pendant des générations si la nourriture était sèche. Cependant, il réapparaissait si la progéniture était nourrie avec de la nourriture humide. [Dobzhansky] argumentait qu'un tel exemple et d'autres encore montraient que, même lorsqu'un trait phénotypique était induit par des facteurs environnementaux, il y avait une norme de réaction inchangée qui était transmise héréditairement [*'He argued that this and other such examples showed that, even when environmental factors induced a trait, an unchanged NoR was inherited'*]. L'interprétation de Dobzhansky faisait de la norme de réaction une unité héréditaire mendélienne [*'Dobzhansky's interpretation made the NoR a Mendelian unit of inheritance'*] » (Sarkar 1999, p. 243).

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2 \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

Cela signifie que la charge électrique q_1 , qui se trouve au point P , engendre, au point Q , un certain « état » (« *condition* ») (Feynman, Leighton & Sands 1964 ; 1999, p. 167), que l'on peut décrire au moyen d'un vecteur \mathbf{E} , de telle sorte que

$$\mathbf{F} = q_2 \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q_2} = \frac{q_1 \mathbf{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}$$

(Feynman, Leighton & Sands 1964 ; 1999, p. 167). Le vecteur \mathbf{E} représente donc une quantité « [qui est] présente, que q_2 soit là ou non (à condition que nous maintenions toutes les autres charges à la même place) » (« *that would be there whether q_2 were there or not (provided we keep all the other charges in their right places)* »), et qui n'est rien d'autre que le « champ électrique » (« *electric field* ») qui est engendré par q_1 , alors que le vecteur \mathbf{F} représente « la réponse de q_2 à \mathbf{E} » (« *the response of q_2 to \mathbf{E}* ») (Feynman, Leighton & Sands 1964 ; 1999, p. 167-168). Nous pouvons donc en conclure que la charge q_1 , située au point P , impose une contrainte à la gamme des réponses que l'on peut produire en plaçant une autre charge électrique, quelle qu'elle soit, au point R de l'espace en question. Cependant, la charge q_1 ne peut pas déterminer entièrement une seule et unique réponse, car la nature spécifique de la réaction qui est causée au point R dépend exclusivement de la valeur de la charge qui y est placée. Nous pouvons, par ailleurs, généraliser la notion de champ électrique en choisissant une charge q_1 et en considérant l'espace de tous les positions P_i , avec $i \in \{1, \dots, N\}$, sur lesquelles agit le champ électrique qui est engendré par q_1 , c'est-à-dire \mathbf{E}_{q_1} . Si nous supposons que $P_i = q_i$, lorsque la position en question est occupée par une certaine charge q_i , et $P_i = 0$, lorsqu'elle est vide, nous pouvons ainsi définir la force \mathbf{F}_i , déterminée par le champ électrique à la position P_i , au moyen de la fonction suivante :

$$\mathbf{F}_i = f(q_1, P_i), \forall i \in \{1, \dots, N\},$$

si bien que nous pouvons également écrire que

$$f = P_i \mathbf{E}_{q_1} = E_{q_1}(P_i), \forall i \in \{1, \dots, N\},$$

où $E_{q_1}(P_i)$ n'est rien d'autre que le champ électrique engendré par q_1 , lorsqu'il est exprimé en fonction d'une certaine position P_i . De même, si nous choisissons un certain génotype, g_1 , dans le *pool* génétique d'une population donnée et nous considérons l'espace de toutes les conditions environnementales dans lesquelles peut vivre une population donnée, C_i , avec $i \in \{1, \dots, N\}$, nous pouvons définir un phénotype donné, Ph_i , comme étant la fonction

$$Ph_i = f(g_1, \{C_i\}_{i \in \{1, \dots, N\}}),$$

si bien que

$$f = Nor_{g_1}(\{C_i\}_{i \in \{1, \dots, N\}}),$$

où $Nor_{g_1}(\{C_i\}_{i \in \{1, \dots, N\}})$ représente, précisément, ce que nous pourrions appeler la « norme de réaction » du génotype g_1 , en fonction des conditions environnementales $\{C_i\}_{i \in \{1, \dots, N\}}$. Il en découle qu'un tel formalisme nous permet de mettre en évidence l'existence d'une certaine relation d'analogie, quoique de nature purement formelle, entre la norme de réaction d'un certain génotype et le champ électrique qui définit la force électrostatique qui peut se manifester à tel ou tel endroit, comme réponse dynamique à l'action qu'y exerce la charge qui engendre précisément le champ en question. Mais quelle serait donc la force que déterminerait la norme de réaction qui est engendrée par un génotype donné ? D'un point de vue strictement formel, si nous comparons les équations

$$\mathbf{F}_i = f(q_1, P_i), \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

$$Ph_i = f(g_1, C_i), \forall i \in \{1, \dots, N\},$$

nous pouvons nous apercevoir que l'analogie de la force \mathbf{F}_i dans l'équation que nous avons utilisée pour formaliser le concept de norme de réaction n'est rien d'autre que le phénotype Ph_i . Nous pouvons donc en conclure que le concept de norme de réaction nous permet d'envisager le pouvoir causal que les gènes exercent sur les caractères phénotypiques comme étant analogue à la contrainte qu'une charge donnée exerce sur les réponses que l'on peut produire, sous la forme d'une force électrostatique de Coulomb, en plaçant une autre charge dans le champ électrique qui est engendrée par celle-là. Néanmoins, comme la réalisation de tel ou tel phénotype qui appartient à une seule et même norme de réaction dépend – d'après la définition même que Dobzhansky (1951) donnait du concept de norme de réaction – des conditions environnementales, C_i , dans lesquels il se trouvera au cours de son développement, et donc de sa valeur sélective par rapport à ces mêmes conditions, nous

pouvons également en conclure que la force plus fondamentale qui détermine le phénotype Ph_i , en tant que réponse à la norme de réaction qui est engendrée par le génotype g_1 , n'est rien d'autre que la sélection naturelle qui agit sur le phénotype en question. Il s'ensuit que, dans la formalisation du concept de norme de réaction que nous venons de proposer, les gènes exercent leur pouvoir de contrainte sur la sélection elle-même, quoique seulement de manière indirecte, c'est-à-dire en restreignant la gamme des phénotypes qui peuvent se réaliser sous l'action de cette dernière, dans des conditions environnementales données. Cela dit, comme nous l'avons vu plus haut, Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) envisageait l'évolution comme étant un processus génétique qui consisterait dans une variation de fréquences alléliques qui est causée par l'action des différents facteurs évolutifs qui interviennent dans la théorie de l'équilibre fluctuant de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932), parmi lesquels la sélection naturelle jouerait un rôle que Dobzhansky (1951, 1970) lui-même avait fini par considérer comme prédominant. Il en découle que, afin d'étayer notre interprétation de la manière dont Dobzhansky (1951, 1970) conceptualisait le pouvoir de contrainte que les gènes exercent sur les phénotypes, nous devons également montrer en quoi ce dernier concevait – déjà en 1937, mais, plus particulièrement, à partir de 1951 – la sélection naturelle comme étant un facteur qui agirait au niveau génétique (ou, plus précisément, au niveau génotypique).

Pour ce faire, il est nécessaire de mettre en relation le concept de norme de réaction avec le concept de norme adaptative, définie comme étant « l'ensemble des génotypes (compatibles avec les exigences de l'environnement) que possède une population d'une espèce donnée » (« *the array of genotypes (compatible with the demands of the environment) possessed by a given population of a species* ») (King, Mulligan & Stansfield 2006, p. 8). Il s'agit, notamment, d'un concept que Dobzhansky (1970) a utilisé pour la première fois dans *Genetics of the Evolutionary Process*, dans le but de dresser une distinction entre différents types de sélection naturelle³⁹⁹. Plus précisément, il

³⁹⁹ Comme l'a remarqué, encore une fois, Sarkar (1999), le concept même de « norme adaptative » a été forgé par Schmalhausen (1949) dans le but de caractériser une forme particulière de pression de sélection, qu'il qualifiait de « sélection stabilisante » (« *stabilizing selection* »), où, par « stabilisation » (« *stabilization* ») il faut comprendre « le remplacement d'une réponse phénotypique adaptative par une réponse génotypique qui est phénotypiquement identique, ce qui assure la transmission du phénotype aux générations futures » (« *the replacement of an adaptive phenotypic response by a phenotypically identical genotype response, ensuring the phenotype's transmission to future generations* ») (Sarkar 1999, p. 244). C'est ainsi que, en partant du présupposé que la norme de réaction d'un génotype donné serait héréditaire, Schmalhausen (1949) pouvait définir le concept de norme adaptative de la manière suivante : « chaque génotype se caractérise par sa propre 'norme de réaction' spécifique, qui inclut des modifications adaptatives de l'organisme à différents environnements [*which includes adaptive modifications of the organism to different environments*']. Lorsque l'expression des modifications adaptatives est si complète qu'elle transforme l'organisme tout entier, on dit que le génotype possède des normes adaptatives, qui sont des expressions particulières de la norme générale

entendait s'en servir pour affronter le problème suivant : puisque le phénotype réalisé qui est associé à ce qu'on pourrait appeler « la norme de réaction moyenne » d'un certain génotype, au sein d'une population donnée, aura une valeur sélective positive dans certaines conditions environnementales, mais une valeur sélective négative dans d'autres, de quelle manière cette différence de valeurs sélectives finira-t-elle par affecter la structure génétique de ladite population, et donc, par ce même biais, l'ensemble de génotypes qui constitue la norme adaptative du phénotype en question ? Afin de répondre à une telle question, Dobzhansky (1970) s'appuyait sur les travaux du zoologiste ukrainien Ivan Schmalhausen (1949) pour distinguer la « sélection [naturelle] dynamique » (« *dynamical selection* »), ou « directionnelle » (« *directional* »), de la « sélection [naturelle] stabilisante » (« *stabilizing selection* ») (Dobzhansky 1970)⁴⁰⁰. C'est ainsi que Dobzhansky (1970) pouvait concevoir la première forme de sélection comme étant un processus qui modifie la norme adaptative d'une population donnée, tandis qu'il définissait la seconde comme étant un processus qui a pour effet de maintenir une telle norme constante. Ainsi définie, la sélection dynamique agit, par conséquent, sur des populations dont les phénotypes n'ont pas encore atteint, en moyenne, un degré élevé d'adaptation à leurs propres conditions environnementales, puisqu'elle modifie les normes adaptatives de ces mêmes phénotypes particuliers afin d'en augmenter les valeurs sélectives. La sélection naturelle normalisante agit, au contraire, sur « une population qui a atteint un degré d'adaptation élevé par rapport à une certaine gamme d'environnements » (« *a population that has achieved a high degree of adaptedness in a certain range of environments* »), si bien que « son patrimoine génétique est tellement avantageux qu'il est devenu inopportun de s'en écarter » (« *its genetic endowment is advantageous, and deviations from it are inopportune* ») (Dobzhansky 1970, p. 95-96). Cette autre forme de sélection naturelle contribue, en conséquence, à préserver la norme adaptative de telle ou telle population « en éliminant les variantes [phénotypiques] qui sont mal adaptées, [c'est-à-dire] la charge génétique de la population telle qu'elle a été exprimée au cours du développement des individus qui la composent » (« *by trimming off ill-adapted variants, the*

de réaction [*'When expression of the adaptive modifications is so complete that it transforms the entire organization, the genotype is said to possess adaptive norms, which are particular expressions of the general norm of reaction'*] » (Schmalhausen 1949 ; 1986, p. 7 ; cité par Sarkar 1999, p. 244).

⁴⁰⁰ « Que le terme 'sélection naturelle' ne soit qu'un nom commun que l'on attribue à un certain nombre de processus apparentés, mais distincts [*'a common name for several cognate but distinct processes'*], cela n'a été reconnu qu'au cours des dernières années. Schmalhausen (1949) a distingué la sélection dynamique (directionnelle) de la sélection stabilisante [*'dynamic (directional) and stabilizing selection'*]. La première modifie la norme adaptative de la population en question, la seconde tend à la maintenir constante [*'The first changes the adaptive norm of the population, the second tends to keep it constant'*] » (Dobzhansky 1970, p. 95).

expressed genetic load of the population ») (Dobzhansky 1970, p. 166)⁴⁰¹. En s'appuyant également sur les travaux de Waddington (1957)⁴⁰², Dobzhansky (1970) distinguait, en outre, deux formes ultérieures de sélection naturelle, à savoir la « sélection [naturelle] normalisante » (« *normalizing selection* »), ou « canalisante » (« *canalizing* ») et la « sélection [naturelle] diversifiante » (« *diversifying selection* »), ou « perturbatrice » (« *disruptive* ») (Dobzhansky 1964). La première n'est rien d'autre qu'une forme particulière de sélection naturelle stabilisante, puisqu'elle favorise les phénotypes médians, tandis que la seconde représente une forme particulière de « sélection équilibrante » (« *balancing selection* »), c'est-à-dire qu'elle constitue un processus de sélection qui maintient l'hétérogénéité génétique, ou polymorphisme, d'une population donnée, puisqu'elle favorise les variantes phénotypiques extrêmes (Dobzhansky 1970, p. 166-167), et donc la fixation de « génotypes différents dans des sous-environnements ou dans des niches écologiques différentes » (« *different genotypes in different sub-environments or ecological niches* ») (Dobzhansky 1970, p. 127). Nous pouvons donc en conclure que le concept de norme adaptative a joué un rôle fondamental dans la conceptualisation du rôle de la sélection naturelle que Dobzhansky (1951, 1970) a fini par

⁴⁰¹ Plus précisément, Dobzhansky et Boris Spassky (1963) avaient défini le concept de « charge génétique », relativement à celui de norme adaptative, de la manière suivante : « Les populations naturelles de drosophiles, d'hommes et probablement de tous les organismes sexués et diploïdes qui se reproduisent par hybridation [*'all sexual, diploid, and outbreeding organisms'*] contiennent une multitude de génotypes. La plupart de ces génotypes rendent leurs porteurs raisonnablement bien adaptés pour survivre et se reproduire dans les environnements que la population rencontre le plus souvent dans ses habitats naturels [*'A majority of these genotypes make their carriers tolerably well adapted to survive and to reproduce in the environments which the population frequently encounters in its natural habitats'*]. La gamme de ces génotypes constitue la norme adaptative de l'espèce ou de la population en question [*'The array of such genotypes constitutes the adaptive norm of the species or population'*]. Certains génotypes présentent, toutefois, une faible valeur sélective dans les environnements habituels [de leur espèce]. Ces génotypes représentent la charge génétique de la population [*'these compose the genetic load of the population'*]. En conclusion, certains génotypes confèrent une valeur sélective qui est nettement supérieure à la valeur sélective moyenne de la norme adaptative de l'espèce ou de la population en question. Ces génotypes sont l'élite génétique de la population [*'some genotypes confer a fitness distinctly above the mean of the adaptive norm; these are the genetic elite of the population'*] » (Dobzhansky & Spassky 1963, p. 1467).

⁴⁰² « Waddington (1957) distingue deux sortes de sélection stabilisante, la sélection normalisante et la sélection canalisante [*'normalizing and canalizing'*]. La première protège la norme adaptative en éliminant les mutants délétères, les malformations et les faiblesses de toute sorte [*'by the elimination of harmful mutants, malformations, and weaknesses of various sorts'*]...La sélection canalisante, écrit Waddington, favorise 'des génotypes qui contrôlent des systèmes développementaux qui sont hautement canalisés et qui ne sont, par conséquent, pas très réactifs aux anomalies environnementales ou aux mutations génétiques de caractère mineur' [*'genotypes which control developmental systems which are highly canalized and therefore not very responsive either to abnormalities in the environment or to new gene mutations of minor character'*] » (Dobzhansky 1970, p. 96), c'est-à-dire, encore une fois, des génotypes qui sont associés à des phénotypes médians.

développer dans les deux dernières éditions de *Genetics and the Origin of Species*, en ceci que les différents modes d'action de la sélection que nous venons de décrire ne sont rien d'autre qu'autant de manières dont ce même facteur évolutif peut modifier la norme adaptative d'une population donnée. Cela dit, en quoi un tel concept serait-il relié à celui de norme de réaction ? En quoi nous permettrait-il de caractériser la sélection naturelle, telle que la concevait Dobzhansky (1970) lui-même, comme étant un facteur qui agit au niveau génétique ?

Pour répondre à ces autres questions, nous pouvons revenir au formalisme que nous venons d'introduire afin de caractériser le concept de norme de réaction. En effet, si nous prenons en considération une population qui contient un ensemble de génotypes G_i , avec $i \in \{1, \dots, M\}$, que nous pouvons regarder comme étant la norme adaptative associée au phénotype réalisé moyen Ph_1 , alors nous pouvons formaliser un tel concept, tel que le définissait Dobzhansky (1970) lui-même, de la manière suivante :

$$\{G_i\}_{i \in \{1, \dots, M\}} = f(Ph_1, \{C_j\}_{j \in \{1, \dots, N\}}),$$

$$f = W_{Ph_1}(\{C_j\}_{j \in \{1, \dots, N\}}),$$

où $\{C_j\}_{j \in \{1, \dots, N\}}$ représente l'ensemble des conditions environnementales dans lesquelles vit la population en question et $W_{Ph_1}(\{C_j\}_{j \in \{1, \dots, N\}})$ constitue la valeur sélective, ou *fitness* darwinienne, du phénotype Ph_1 lorsqu'elle est exprimée en fonction de différents environnements ou de différentes niches écologiques. Ce faisant, nous pouvons donc établir, encore une fois, une analogie formelle entre le champ dynamique que représente notre formalisme et le champ électrique qui est engendré par une charge donnée et qui définit, à son tour, une force électrostatique comme réponse dynamique locale à l'action de cette même charge. Cependant, dans cet autre cas de figure, le champ en question n'est pas la norme de réaction qui est engendrée par un génotype donné et qui détermine un certain phénotype réalisé, c'est-à-dire qui impose une contrainte à la pression de sélection qui agit sur ce même phénotype. Il s'agit, bien au contraire, du champ dynamique qui correspond à l'ensemble des différentes valeurs sélectives que l'on peut attribuer au phénotype Ph_1 , en fonction des conditions environnementales $\{C_i\}_{i \in \{1, \dots, N\}}$, et qui détermine la norme adaptative, associée à ce même phénotype, que forment les génotypes G_i , c'est-à-dire au champ dynamique qui correspond aux différents modes d'action de la sélection naturelle sur la norme adaptative en question. Nous pouvons donc en conclure qu'il y a une seule et même raison pour laquelle l'on peut affirmer, d'une part, que le concept de norme adaptative, tel que le présentait Dobzhansky (1970), est lié à celui de norme de réaction et,

d'autre part, que ce même concept nous permet de caractérisait la sélection naturelle, toujours du point de vue de Dobzhansky (1951, 1970), comme étant un facteur qui agit au niveau génotypique. Une telle raison consiste en ceci que, d'après notre interprétation des écrits de Dobzhansky (1951, 1970), la sélection naturelle serait, à la fois, la réponse dynamique que déclencherait, quoique de manière indirecte, le champ qui correspond à la norme de réaction d'un génotype donné et le facteur qui déterminerait, à son tour, le champ qui définit la norme adaptative que l'on peut associer à un certain phénotype réalisé moyen. Ces deux champs – que nous pourrions appeler, respectivement, « champ du développement » (ou « de l'expression des gènes ») et « champ de la sélection » – ne sont, en effet, pas seulement complémentaires, mais ils peuvent également être, pour ainsi dire, « empilés » l'un sur l'autre. D'une part, au sein d'une population donnée, un certain génotype définit, en effet, une gamme de phénotypes possibles, dont la réalisation dépend de certaines conditions environnementales. D'autre part, lorsqu'on observe un certain phénotype réalisé moyen, il est toujours possible de supposer que ce même phénotype détermine, en retour, un ensemble de génotypes qui sont, pour ainsi dire, « compatibles » avec la valeur sélective que doit posséder ce même phénotype afin qu'il se réalise et qu'il soit transmis à la génération successive. Autrement dit, alors que tout génotype détermine une certaine norme (phénotypique) de réaction, tout phénotype (réalisé moyen) détermine, à son tour, une norme (génotypique) adaptative. De plus, dans les deux cas, il s'agit d'un champ « accidenté », à l'instar du modèle du paysage adaptatif de Sewall Wright (1931a, 1931b, 1932) : en ce qui concerne le « champ du développement », la rugosité de la surface de *fitness* que l'on peut définir sur la base de ce dernier dépend des valeurs sélectives qui sont associées aux différents phénotypes que comporte la norme de réaction de tel ou tel génotype, en tant que combinaison harmonieuse de gènes, alors que, en ce qui concerne le « champ de la sélection », la rugosité de la surface de *fitness* qui y correspond est due aux différentes valeurs sélectives (justement, génotypiques) que l'on peut attribuer aux

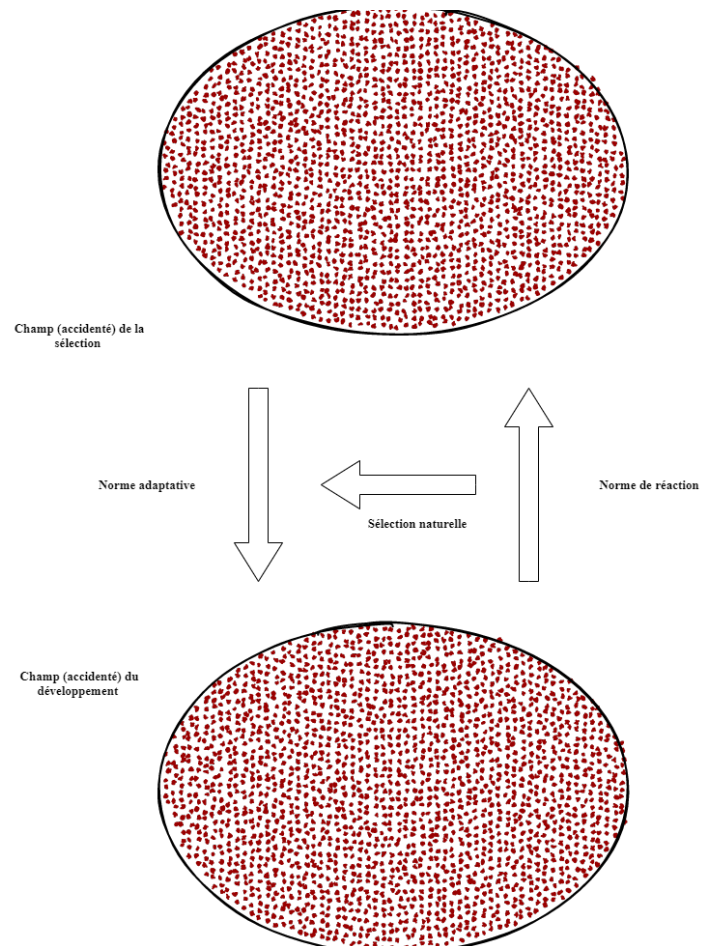


Figure 21 : Diagramme qui représente les rapports entre le champ du développement et le champ de la sélection, sur la base de Dobzhansky (1951, 1970)

génotypes qui constituent la norme adaptative de tel ou tel phénotype réalisé moyen. En d'autres termes, nous pouvons en conclure qu'un paysage adaptatif, tel que le comprenait Dobzhansky (1951, 1970), ne serait, au fond, pas autre chose que le résultat de la superposition de deux champs d'une telle nature. C'est pourquoi nous pouvons représenter les relations qui existent entre ces derniers au moyen du diagramme que l'on peut observer à la figure (21) et qui nous montre, précisément, que la sélection naturelle constitue le facteur qui permet de faire le lien entre le champ du développement et le champ de la sélection. D'une part, la sélection naturelle n'est rien d'autre que l'effet des différences qui existent entre les normes de réaction des divers génotypes qui forment le *pool* génétique d'une population donnée. En effet, quelle que soit la réponse que l'on donne à la question de savoir quelles sont les entités qui représentent les « unités » (« *units of selection* ») ou les « cibles » (« *targets of selection* ») de la sélection naturelle (Lloyd 2005), il n'en demeure pas moins vrai que ce sont les phénotypes – ou les « effets phénotypiques » (« *phenotypic effects* »), tels que les envisageait Dawkins (1982)⁴⁰³ –, qui représentent « les objets immédiats de la sélection » (« *the proximal subjects of selection* ») (Dawkins 1982, p. 47). Il en découle que, afin que se produise un processus de sélection naturelle, il est nécessaire qu'il existe des différences entre les phénotypes des divers organismes, et donc des différences entre les normes de réaction des génotypes dont ils sont porteurs. D'autre part, comme nous l'avons vu plus haut, la sélection naturelle est également la cause des différences qui existent entre les normes adaptatives des possibles phénotypes réalisés moyens d'une

⁴⁰³ Plus récemment, par exemple, les rapports complexes entre gènes et traits phénotypiques ont fait l'objet de la théorie du « phénotype étendu » (« *extended phenotype* ») de Richard Dawkins (1982), c'est-à-dire d'une tentative de les intégrer dans une vision de l'évolution « du point de vue des gènes » (« *gene's eye view of evolution* ») (Sterelny & Griffiths 1999). Le but d'une telle théorie est, en effet, de montrer que la sélection naturelle agit sur des ensembles de « réplicateurs génétiques » (« *genetic replicators* ») – et donc de gènes – qui sont mutuellement compatibles. Ces ensembles de réplicateurs sont sélectionnés de manière indirecte, par l'intermédiaire des « effets phénotypiques » (« *phenotypic effects* ») qu'ils produisent. Néanmoins, la portée de l'action causale qu'exercent de tels effets ne se limite pas à la détermination des traits phénotypiques des organismes qui possèdent tel ou tel complexe de gènes. Bien au contraire, par effet phénotypique, Dawkins (1982) désigne toute forme d'action que les gènes exercent indirectement « sur le monde en général, et seulement de manière incidente sur l'organisme comme individu – ou sur tout autre véhicule – dans lequel [ils se trouvent] à siéger » (« *an effect upon the world at large, and only incidentally upon the individual organism – or any other vehicle – in which it happens to sit* ») (Dawkins 1982, p. 117). Une telle théorie a donc permis l'élaboration de modèles quantitatifs dont le but est d'expliquer les effets indirects des gènes, la construction de niches et l'existence de boucles de rétroaction évolutives – telles que la « sélection dépendante de la fréquence » (« *frequency-dependent selection* »), la « coévolution hôte-parasite » (« *host-parasite coevolution* ») et la « sélection de parentèle » (« *kin selection* ») – sur la base des principes de la génétique des populations (Bailey 2012).

population donnée, ce qui engendre, à son tour, l'émergence de nouvelles normes de réaction et la modification de celles qui existent déjà, en bouclant, en quelque sorte, la boucle⁴⁰⁴.

Néanmoins, de quelle manière cette conception des rapports entre génotype et phénotype – que nous avons tirée des écrits de Dobzhansky (1951, 1970) – nous permettrait-elle de répondre à la question de savoir si les liens que la génétique (théorique) des populations entretient avec les autres branches des sciences de la vie, dans le cadre de la théorie synthétique, correspondent – du moins tels que les envisageait Ruse (1973) – aux différents types de contraintes substantielles que nous avons identifiés dans notre analyse de la conception classique des théories scientifiques (des contraintes d'ordre ontologique, d'ordre épistémologique et d'ordre cognitif), c'est-à-dire à la question de savoir si la définition de la notion même de cadre conceptuel que nous avons établie sur la base d'une telle conception s'applique au cas de la théorie synthétique ?

Afin de répondre à cette question, nous pouvons revenir sur l'image de la structure de la théorie synthétique de l'évolution qui émerge des arguments de Ruse (1973) afin de préciser en quoi devraient consister, d'un point de vue « substantiel », l'architecture des concepts et, d'un point de vue linguistique et formel, la structure logico-syntaxique d'un tel cadre conceptuel si ce dernier se conformait aux canons de la conception classique des théories scientifiques. Plus précisément, nous pouvons représenter une telle architecture et une telle structure au moyen des diagrammes que l'on peut voir à la figure (22), respectivement à gauche et à droite. Les notions de champ du développement et de champ de la sélection, que nous avons définies dans le but de

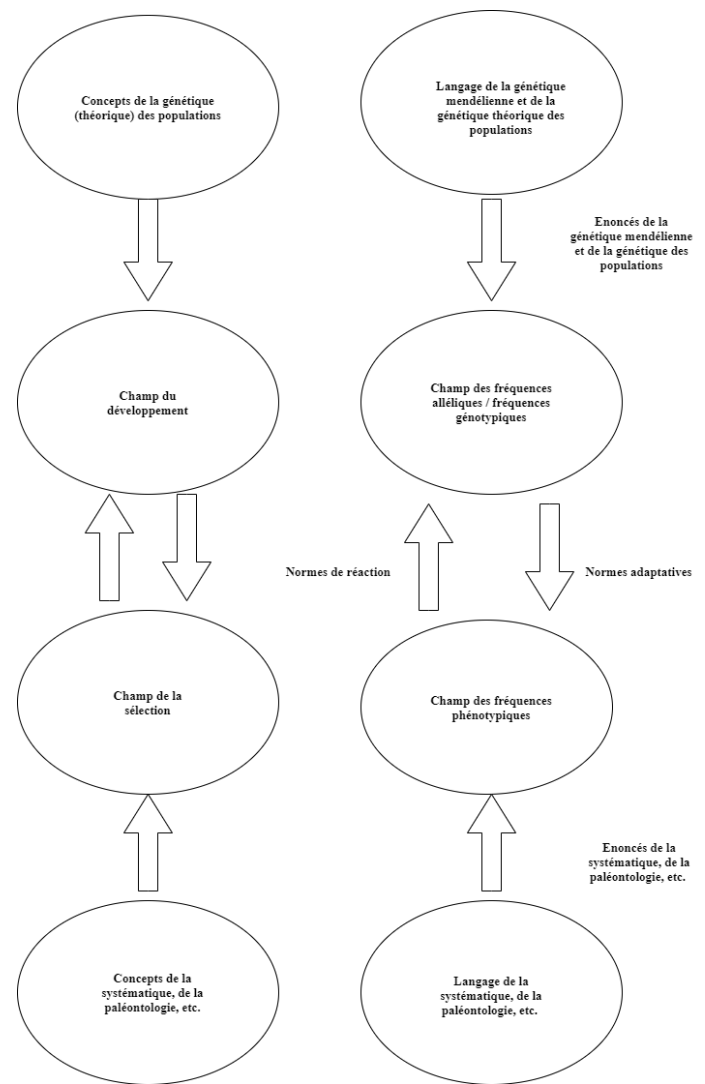


Figure 22 : Représentations diagrammatiques de l'architecture de concepts et de la structure logico-syntaxique de la théorie synthétique, à partir de Dobzhansky (1951, 1970) et Ruse (1973)

⁴⁰⁴ Pour reprendre l'expression d'Elliott Sober (1984a), « les causes de l'évolution se décrivent en termes phénotypiques et... les effets de l'évolution se mesurent dans le langage des fréquences géniques » (« *the causes of evolution are described in phenotypic terms, and... the effects of evolution are calibrated in the language of gene frequencies* ») (Sober 1984a, p. 37).

formaliser les concepts de norme de réaction et de norme adaptative, nous permettent, en effet, d'établir un lien entre le domaine conceptuel de la génétique (mendélienne et des populations), d'une part, et les autres branches des sciences de la vie qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique, telles la systématique, la paléontologie, etc., d'autre part. Par conséquent, si nous envisageons les concepts de ces autres sciences et les concepts de la génétique comme étant, respectivement, des concepts empiriques et des concepts plus abstraits, au sens large de ces termes, nous pouvons en conclure que la manière dont les notions de champ du développement et de champ de la sélection permettent de définir les rapports causaux entre génotypes et phénotypes, dans une perspective évolutionniste, consiste à établir des principes pont entre ces deux domaines conceptuels. Mais en quoi pourrions-nous considérer que les concepts de la génétique seraient, relativement à ceux des autres disciplines qui s'inscrivent dans la théorie synthétique, des concepts plus abstraits ? Si nous revenons sur la manière dont Dobzhansky (1951, 1970) lui-même présentait les différences entre phénotype et génotype, nous pouvons nous apercevoir qu'une telle distinction se réduirait, de son point de vue, à deux couples d'oppositions. Le premier n'est rien d'autre que le couple « observable, non-observable », en ceci que le phénotype était défini par Dobzhansky (1970) comme étant, justement, « ce qu'un être vivant paraît être à nos organes sensoriels, sans ou avec l'aide de divers appareils [d'observation] » (« *what a living being appears to be to our sense organs, unaided or assisted by various devices* ») (Dobzhansky 1970, p. 32), par opposition au génotype, que, comme nous l'avons vu plus haut, Dobzhansky (1951, 1970) caractérisait comme étant une somme d'informations héréditaires. Le second couple est, en revanche, le couple « instable, stable », puisque Dobzhansky (1970) précisait que, alors que « le phénotype d'un individu change de manière continue de la naissance jusqu'à la mort » (« *the phenotype of an individual changes continuously from birth to death* ») (Dobzhansky 1970, p. 32), le « génotype est stable » (« *genotype is stable* »), « à l'exception des mutations somatiques » (« *barring somatic mutations* »), car « les gènes se reproduisent eux-mêmes » (« *genes reproducing themselves* ») (Dobzhansky 1970, p. 32). Nous pouvons donc en conclure que, compte tenu de l'ambiguïté de la dichotomie entre concepts qui sont associés à des objets observables et concepts qui sont associés à des entités théoriques – ce que reconnaissaient aussi bien Ruse (1973) que Carnap (1966) –, les concepts qui ont trait aux aspects phénotypiques de l'évolution sont caractérisables comme étant des concepts empiriques, si bien qu'il est justifiable de considérer les concepts génétiques comme étant, par opposition à ces derniers, des concepts plus abstraits.

Il en découle que la représentation de l'architecture de concepts qui caractérise la théorie synthétique, comme cadre conceptuel, que nous pouvons établir en nous servant des notions de norme de réaction et de norme adaptative correspond, d'un point de vue formel et linguistique, à une

structure logico-syntaxique qui s'articule sur quatre niveau. Au sommet, nous pouvons identifier le domaine du langage de la génétique mendélienne et de la génétique des populations, qui n'est rien d'autre que le langage formel L_T que nous pourrions utiliser dans le cadre d'une axiomatisation de ces deux disciplines sur les mêmes lignes que celle que proposait Ruse (1973), alors que, au pôle opposé, se trouve le domaine du langage de sciences telles que la systématique, la paléontologie, etc., c'est-à-dire du langage L_O dont nous pourrions nous servir pour représenter les concepts qu'elles mobilisent, en tant que concepts empiriques. Entre ces deux domaines linguistiques, se trouvent deux champs qui jouent un rôle analogue à la fonction que remplit le domaine des coordonnées spatio-temporelles dans la structure logico-syntaxique du langage formel, L , des théories physiques en tant que systèmes axiomatiques formalisés – du moins telle que la concevait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000) lui-même – que nous avons représentée à la figure (4). D'une part, il s'agit donc du champ de fréquences génotypiques ou alléliques qui constitue le domaine d'application directe des termes du langage de la génétique mendélienne et de la génétique (théorique) des populations, en ceci que les postulats, et plus généralement les énoncés, de ces deux disciplines se laissent formuler sous la forme de relations entre fréquences génotypiques ou alléliques. En cela, un tel champ est analogue au domaine de coordonnées spatio-temporelles dont parlait Carnap (1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000), puisque ce dernier représente, précisément, le domaine d'application directe des termes du langage théorique de la physique. D'autre part, il s'agit du champ de fréquences phénotypiques qui forme le domaine d'application directe des termes des langages des autres disciplines qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique de l'évolution. Comme, sur la base de notre analyse des textes de Dobzhansky (1951, 1970), nous pouvons émettre l'hypothèse que, lorsqu'elles sont conçues sous la forme de relations formelles entre ensembles de génotypes et ensembles de phénotypes, les normes de réaction et les normes adaptatives constituent des postulats (ou règles) de correspondance, nous pouvons considérer que cet autre champ serait, lui aussi, analogue au domaine des coordonnées spatio-

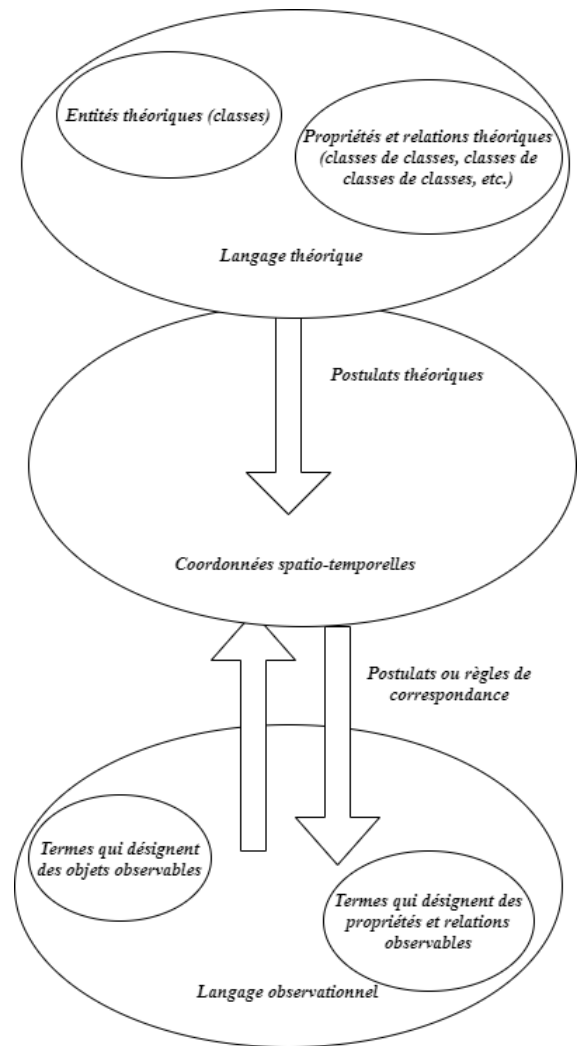


Figure 4 : Diagramme qui représente la structure logico-syntaxique du langage formel L , telle que l'envisageait Carnap (1956a, 1958).

temporelles de la structure logico-syntaxique des théories scientifiques. Tout comme ce dernier, le champ de fréquences phénotypiques dont il est question ici permet, en effet, d'établir, quoique de manière indirecte, un lien entre les langages observationnels de la systématique, de la paléontologie, etc., avec le langage théorique de la génétique, et cela justement par l'intermédiaire de postulats de correspondance. En raison de toutes les considérations que nous venons de faire, il semble donc justifié d'affirmer qu'une analyse croisée des arguments de Ruse (1973) et des textes de Dobzhansky (1951, 1970) permet d'étayer l'hypothèse que la conception classique des théories scientifiques représenterait, un tant que cadre métalinguistique et métathéorique, un cadre analytique pour la formalisation de la théorie synthétique de l'évolution. Cela dit, qu'en est-il de la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que l'on peut définir à partir de ce même cadre métalinguistique et métathéorique ?

Cette autre question est étroitement liée à celle – que nous avons posée plus haut – de savoir en quoi les objets que désignent les termes de la génétique mendélienne et de la génétique des populations diffèrent des objets que désignent les termes des autres disciplines qui s'inscrivent dans le cadre de la théorie synthétique, de savoir en quoi les concepts abstraits qui relèvent de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir un réseau de relations formelles entre les concepts qui relèvent, encore une fois, de ces autres disciplines, ainsi que de savoir dans quelle mesure les concepts génétiques seraient des concepts ouverts. En ce qui concerne les différences entre les objets de la génétique et les objets des autres disciplines, elles se réduisent, quoique de manière purement schématique, à la distinction entre génotype et phénotype, au sujet de laquelle – du moins telle que la présentait Dobzhansky (1951, 1970) – nous pouvons tout simplement réitérer les remarques que nous avons faites plus haut. Quant au problème des relations formelles que l'on pourrait établir entre les concepts de la systématique, de la paléontologie, etc. au moyen des concepts de la génétique (mendélienne ou des populations), nous pouvons prendre en considération, en guise d'exemple paradigmatique, la façon dont G. G. Simpson (1939, 1944) s'est approprié la conceptualisation des fondements génétiques de l'évolution qu'avait proposée, justement, Dobzhansky (1937, 1941), ainsi que les concepts statistiques sur lesquels repose la génétique (théorique des populations), et notamment le concept de courbe normale, afin de mettre en relation la microévolution phénotypique des populations de drosophiles qu'étudiaient les généticiens expérimentaux et la macroévolution phénotypique des *taxa* supérieurs, c'est-à-dire l'un des objets d'étude des paléontologues. Telle que l'envisageait Simpson (1939), la courbe normale ne serait rien d'autre qu'une hypothèse sur le rapport qui existe entre la distribution des valeurs des caractères d'une population donnée et celle des valeurs des caractères de l'échantillon qu'on a pu effectivement observer. Autrement dit, il s'agirait d'une hypothèse qui donnerait aux zoologistes les moyens de

généraliser au niveau des populations entières les conclusions qu'ils ont pu tirer au sujet d'un nombre limité d'observations empiriques. C'est en cela que résiderait, par conséquent, son utilité, qui se déclinerait, par ailleurs, de deux manières différentes, à savoir de manière rétrospective, en ceci que les courbes normales servent précisément à approximer les patrons de distribution statistique des données zoologiques, mais également de manière prospective, dans la mesure où elles permettent de calculer les valeurs de probabilité que l'on peut s'attendre à observer dans des conditions données (Simpson 1939, p. 74). De plus, c'est également en cela que la façon dont Simpson (1939, 1944) se servait de méthodes d'analyse quantitative, et notamment de méthodes d'inférence statistique, nous permet de mettre en valeur un autre aspect de sa démarche, c'est-à-dire l'application à des « patrons de diversité à grande échelle dans l'histoire de la vie » (« *large-scale patterns of diversity in the history of life* ») de modèles issus de la démographie et de la génétique des populations (Gould 1980a, p. 159 ; Sepkoski 2009, p. 25). C'est en cela que consiste, précisément, l'un des éclairages les plus fondamentaux que la lecture de *Genetics and the Origin of Species* (Dobzhansky 1937, 1941) ait apportés à la réflexion de Simpson (Sepkoski 2009, p. 23). Plus précisément, la révolution épistémologique que Simpson (1944) a contribué à susciter dans le domaine de la paléontologie a consisté à redéfinir l'objet de cette dernière par analogie avec la génétique des populations : alors que la paléontologie traditionnelle s'était occupée des fossiles en tant qu'éléments de séries stratigraphiques, la paléontologie telle que la concevait Simpson (1944) devait s'occuper des fossiles comme individus – ou, plus précisément, traces d'individus – appartenant à des populations disparues. Ce faisant, Simpson (1944) a introduit dans la paléontologie le concept de population dans sa double signification, à savoir à la fois comme population statistique et comme population mendélienne, et c'est précisément une telle opération qui lui a permis de renouveler les interrogations fondamentales qui structuraient sa propre discipline, comme l'a relevé, par exemple, Gould (1980a, p. 159). En conséquence, c'est précisément pour une telle raison que nous pouvons considérer le cas de Simpson (1939, 1944) comme étant paradigmatique de la façon dont les concepts théoriques de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir des relations formelles entre des concepts empiriques qui relèvent d'autres branches des sciences de la vie, ne serait-ce que de manière purement analogique. Il faut, d'ailleurs, préciser que, par analogie, nous entendons ici un rapport homogène entre termes qui ne sont pas homogènes, par opposition à l'homologie, en tant que rapport homogène entre termes homogènes. Il existe, en effet, une différence d'échelle entre les populations qui font l'objet de la génétique des populations et celles auxquelles s'intéressent les paléontologues : comme les généticiens des populations s'intéressent principalement à des phénomènes micro-évolutifs, les premières sont premièrement conçues comme des populations d'organismes, alors que, puisque les paléontologues étudient normalement des phénomènes macro-évolutifs, les secondes

correspondent généralement à des *taxa* d'ordre supérieur, tels que des *phylum* qui se composent de différents genres.

Quant à la question de savoir si l'on pourrait qualifier les concepts de la génétique mendélienne et de la génétique des populations de « concepts ouverts », nous pouvons nous limiter à prendre en considération la notion centrale qui structure ces deux disciplines, c'est-à-dire la notion de « gène mendélien ». Comme nous l'avons rappelé plus haut, cette notion n'est, en effet, que l'une des composantes d'un concept plus général, c'est-à-dire le concept de gène. Il se trouve que, bien qu'un tel concept ait constitué « un principe organisateur majeur pour la biologie du XX^{ème} siècle » (« *an important organizing principle in twentieth-century biology* ») (Rheinberger & Müller-Wille 2017, p. 4), il s'avère ardu d'en donner une définition précise et exhaustive, si bien que d'aucuns ont suggéré qu'il vaudrait mieux l'abandonner, au profit, par exemple, du concept de « matériel génétique » (« *genetic material* ») (Kitcher 1982 ; Burian 2005). L'on peut néanmoins considérer, comme l'ont fait Hans-Jörg Rheinberger et Staffan Müller-Wille (2017), que la nature ambiguë de ce concept ne serait pas un défaut, car elle témoignerait de sa capacité à prendre « différentes significations relativement à tel ou tel domaine de la réalité biologique [*'different meanings with respect to different domains of biological reality'*] – la transmission, le développement, les fonctions physiologiques, l'évolution, pour n'en citer que quelques-uns » – et donc à révéler « une multitude de nouvelles manières de conceptualiser les relations qui existent entre ces mêmes domaines » (« *a range of new ways to conceptualize the relationships between these domains* ») (Rheinberger & Müller-Wille 2017, p. 4). C'est pourquoi Rheinberger et Müller-Wille (2017) ont pu en conclure que, « métaphoriquement parlant,... chaque nouvelle signification du concept de gène a ajouté une dimension supplémentaire le long de laquelle l'on peut imaginer que varie et s'épanouisse la vie » (« *speaking metaphorically,... each new meaning of the gene created an additional dimension along which life could be imagined to vary and unfold* ») (Rheinberger & Müller-Wille 2017, p. 4)⁴⁰⁵, ce

⁴⁰⁵ Autrement dit, pour emprunter les mots de Paul Griffiths et Karola Stotz (2013), « le gène possède aujourd'hui plusieurs identités, qui se sont accumulées au fur et à mesure que les biosciences moléculaires se sont développées et diversifiées » (« *the gene today has several identities which have accumulated as the molecular biosciences have developed and diversified* ») (Griffiths & Stotz 2013, p. 221). Pour n'en nommer que quelques-unes de ces identités, le concept de gène peut représenter une « unité fonctionnelle pour l'analyse génétique » (« *instrumental unit for genetic analysis* »), une « unité [structurelle] de matériel héréditaire » (« *material unit of heredity* »), une « unité d'information de Crick » (« *a unit of Crick information* »), une base abstraite pour les paramètres d'un modèle développemental. Chacune d'entre elles « joue un rôle fécond dans une quelque forme de recherche biologique » (« *plays a productive role in some forms of biological research* »), si bien qu'« il est donc plus pertinent de considérer le concept de gène comme étant un ensemble de représentations qui sont activées par tel ou tel contexte d'application » (« *the concept of the gene is therefore best thought of as a set of contextually activated representations* ») (Griffiths & Stotz 2013, p. 221).

qui montre en quoi il serait possible de considérer un tel concept comme étant, justement, ouvert, contrairement aux concepts fermés des sciences logico-formelles. En conséquence, il semblerait que notre analyse de l'axiomatisation de la théorie synthétique de l'évolution qui a été proposée par Ruse (1973), ainsi que de la conception des relations entre la génétique des populations (en tant que théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle) et la théorie synthétique (comme cadre conceptuel pour les sciences de la vie) que comporte la lecture des différentes éditions de *Genetics and the Origin of Species* de Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) nous permette d'en conclure que la conception classique des théories scientifiques constitue un modèle pertinent pour la formalisation de cette dernière. Il en découle que nous pouvons résumer, au moyen du tableau ci-dessous, la façon dont nous nous sommes servis de la conception classique des théories scientifiques comme cadre analytique général, ainsi que de l'axiomatisation de Ruse (1973) et des contributions de Dobzhansky (1951, 1970), dans le but de reconstruire la théorie synthétique, aussi bien en tant que cadre métathéorique et métalinguistique qu'en tant que cadre conceptuel :

	Termes théoriques	Règles de correspondance	Termes observationnels
Théorie synthétique comme cadre métathéorique et métalinguistique	Termes qui dénotent les concepts de la génétique mendélienne et de la génétique des populations	Normes de réaction et normes adaptatives (Dobzhansky 1951, 1970)	Termes qui dénotent les concepts d'autres branches des sciences de la vie que la génétique (systématique, paléontologie, etc.)
	Contraintes ontologiques	Contraintes épistémologiques	Contraintes cognitives
Théorie synthétique comme cadre conceptuel	Double critère d'existence qui s'applique, de manière différencié, aux objets de la génétique et aux objets des disciplines « phénotypiques »	Les termes et les concepts de la génétique mendélienne et de la génétique des populations permettent d'établir des relations formelles entre les termes et les concepts d'autres disciplines	Les concepts de la génétique mendélienne et de la génétique des populations sont conçus comme étant des concepts « ouverts »

Cela dit, afin que nous puissions étayer une telle conclusion de manière satisfaisante, il nous reste encore une question importante à soulever, c'est-à-dire celle de savoir en quoi la formalisation de la théorie synthétique que nous venons d'esquisser ici, de manière très schématique, serait à même de saisir tous les aspects du concept fondamental par excellence de toute théorie darwinienne de l'évolution, qui n'est rien d'autre que le concept de sélection naturelle. En effet, dans son analyse de la structure de la théorie synthétique, Ruse (1973) définit explicitement le concept de sélection naturelle comme étant un concept qui indique « l'une des manières possibles, mais non triviales, dont le changement génétique pourrait s'effectuer » (« *a non-trivial possible way in which genetic change might be effected* ») (Ruse 1973, p. 39). Une telle définition de la sélection naturelle est parfaitement cohérente avec la conception « mendélisée » de l'évolution, comme changement de fréquences génotypiques (ou alléliques), qu'incarnent les présupposés de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) et que l'on retrouve, par exemple, chez Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970). Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué lorsque nous avons analysé les relations entre les concepts de norme de réaction, de norme adaptative et, justement, de sélection naturelle, la reconstruction formelle de la théorie synthétique que nous venons d'esquisser présuppose que les processus de sélection soient considérés comme des processus qui s'opèrent aussi bien au niveau génétique qu'au niveau phénotypique. Autrement dit, dans le cadre de la formalisation que nous avons esquissée, le concept de sélection naturelle intervient à deux niveaux différents : premièrement, il intervient au niveau du langage de la génétique des populations, en tant que facteur de changement génétique ; deuxièmement, il intervient également au niveau des règles de correspondance qui permettent de mettre en relation le champ des fréquences génotypiques et le champ des fréquences phénotypiques, et cela précisément en raison des liens logiques qu'il entretient avec les notions de norme de réaction et de norme adaptative. Il en découle que nous ne pouvons pas réduire la sélection naturelle au simple rôle de facteur causal de l'évolution génotypique. En conséquence, en quoi pourrions-nous amender notre proposition afin de pouvoir rendre compte de cette généralité du principe de sélection naturelle ? Dans quelle mesure l'axiomatisation qu'a suggérée Ruse (1973), et sur laquelle nous nous sommes basés, se prêterait-elle à une telle généralisation ? En quoi le problème que nous venons de soulever montrerait-il les limites de la conception classique des théories scientifiques en tant que cadre analytique pour la formalisation de la théorie synthétique, et notamment de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie ?

2.3 La théorie synthétique de l'évolution : une théorie des forces génétiquement fondée ?

Il s'ensuit que, comme nous venons de le remarquer, si nous voulons saisir toute la portée du principe et du concept de sélection naturelle, nous ne pouvons pas nous limiter à reléguer cette dernière au rôle de facteur causal de l'évolution génotypique. Plus généralement, nous devons remettre en question le présupposé que, puisque l'une des thèses fondamentales de la théorie synthétique consiste à affirmer que l'évolution peut s'expliquer par l'accumulation de faibles variations génétiques, dont l'émergence et la transmission sont conformes aux mécanismes génétiques connus (Mayr 1980a, 1998a), la génétique des populations suffirait, à elle seule, à constituer le noyau théorique et formel d'un tel cadre conceptuel. Cela découle du fait que, alors que ses effets, en tant que facteur évolutif, se mesurent en termes de variations de fréquences génotypiques ou alléliques, la sélection naturelle est causée, en tant que processus biologique, par l'existence de différences phénotypiques – qui affectent les chances de survie et de reproduction de tel ou tel individu –, ainsi que du fait qu'elle « agit généralement sur les phénotypes, et non pas directement sur les génotypes » (« *usually acts on phenotypes and not directly on genotypes* ») (Thompson 1989, p. 65). C'est précisément pour une telle raison que nous pouvons en conclure que, « contrairement à l'avis de Ruse » (« *contrary to Ruse's position* »), la sélection naturelle ne saurait se réduire à « des coefficients de sélection dans un calcul génétique » (« *selection coefficients in a genetic calculus* ») (Thompson 1989, p. 65). C'est pourquoi nous sommes donc amenés à revenir sur l'une des critiques que Beatty (1980b) et Thompson (1989) ont adressées à l'axiomatisation de Ruse (1973) et que nous avons balayée dans la section précédente, c'est-à-dire la thèse que « les lois de Mendel [et donc également une loi telle que le principe de Hardy-Weinberg] ne sont pas les fondements de la théorie de l'évolution...elles en sont, plutôt, des conséquences » (« *Mendel's laws are not the foundations of evolutionary theory... they are, if anything, its consequences* ») (Rosenberg 1985, p. 134). En effet, comme l'a observé Jean Gayon (2004) en reprenant à son compte un tel argument, bien que le concept de sélection naturelle que l'on retrouve dans les modèles de la génétique des populations puisse constituer le fondement d'« une formulation particulière » du principe de Darwin (1859) qui est théoriquement légitime et dont l'importance historique a été capitale (Gayon 1992), ce serait « une inconséquence théorique » (Gayon 2004, p. 9) que de prétendre que ce principe serait entièrement dérivable à partir de tels modèles. La raison en est, justement, que ces derniers présupposent l'existence des entités, des propriétés et des relations biologiques qui font l'objet de la génétique mendélienne, c'est-à-dire d'entités, de propriétés et de relations qui sont elles-mêmes le produit contingent de l'évolution biologique telle qu'elle s'est déroulée au cours de l'histoire de la planète

terre⁴⁰⁶. Toujours selon Gayon (2004), afin de conceptualiser le principe de sélection naturelle dans toute sa généralité, il est donc nécessaire de l'envisager comme étant une sorte de « loi de la dynamique » qui régirait « la production [des systèmes organiques] à l'échelle de l'histoire générale de la vie » (Gayon 2004, p. 9), quelles que soient leurs caractéristiques particulières, tout comme les lois de Newton (1687) régiraient non pas la production, mais l'évolution (au sens de variation de leur état au fil du temps) des systèmes mécaniques à l'échelle de l'histoire générale de l'univers, « sans se préoccuper de la nature des forces ni de la forme des masses auxquelles » elles s'appliquent (Gayon 2004, p. 10). Autrement dit, nous pouvons en conclure que le principe de sélection naturelle ne saurait se réduire à la description d'un mécanisme de variation génétique précisément parce qu'il constitue non pas une régularité empirique parmi d'autres, mais « l'unique schématisme des sciences biologiques qui a un caractère nomologique » (Gayon 2004, p. 11). En cela, il relève, par conséquent, « du plus haut niveau d'abstraction » dans la théorie synthétique de l'évolution, précisément en tant que dynamique de l'histoire de la vie (Gayon 2004, p. 10). Il semblerait, en conséquence, que nous nous trouvions dans une impasse : d'une part, afin de proposer une formalisation précise et exhaustive de la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, il est nécessaire de considérer le principe de sélection naturelle dans toute sa généralité, c'est-à-dire comme étant une sorte de loi de la dynamique évolutive ; d'autre part, dans le chapitre précédent, nous sommes parvenus à la conclusion que la théorie synthétique repose, toujours en tant que cadre conceptuel, sur une théorie génétique de l'évolution – qui est, justement, étroitement liée aux modèles mathématiques de la génétique (théorique) des populations –, si bien que, si l'on voulait en reconstruire la structure, on ne saurait faire l'économie d'une caractérisation, quoique non exhaustive, de la sélection naturelle comme mécanisme de variation génétique. Cela dit, en quoi serait-il donc possible de concilier ces deux exigences, à l'apparence contradictoires ?

⁴⁰⁶ « Si l'on prend le mot loi au sérieux, c'est-à-dire comme signifiant un énoncé universel de portée illimitée, il n'y pas à proprement parler de 'loi de Hardy-Weinberg', car l'équilibre de Hardy et Weinberg est une extrapolation à partir de la première loi de Mendel, qui n'est pas elle-même une loi. En réalité, la validité de la première loi de Mendel, ou de ce que l'on appelle ainsi, est suspendue à une histoire contrôlée par la sélection naturelle. Bref, bien que la génétique ait, en pratique, joué un rôle historiquement capital dans l'accréditation de l'hypothèse darwinienne de sélection naturelle,... il n'est pas théoriquement raisonnable de chercher à fonder l'universalité du principe de sélection naturelle sur le corpus de la génétique mendélienne. Ce genre de raisonnement mérite sans doute d'être généralisé. Le principe de sélection naturelle ne peut être fondé sur aucune théorie biologique faisant référence à des structures et des processus dont nous savons pertinemment qu'ils ont été eux-mêmes le produit d'une longue évolution. Il est légitime, en pratique, de se contenter d'une formulation particulière du principe de sélection naturelle, liée à des modèles biologiques particuliers. Mais c'est une inconséquence théorique que de définir la sélection naturelle à partir de tels modèles particuliers » (Gayon 2004, p. 8-9).

Afin de répondre à une telle question, il est utile de prendre en considération les conclusions qu'a pu tirer V. B. Smocovitis (1992, 1996) au sujet des contributions que Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) avait lui-même apportées à l'élaboration de la théorie synthétique. Elle estimait, en effet, que de telles contributions auraient joué un rôle fondamental dans l'élaboration d'une conception de la biologie évolutive comme étant une science « quasi-newtonienne » (« *quasi-Newtonian* ») (Smocovits 1992, p. 20-24), c'est-à-dire comme étant, justement, une sorte de « dynamique de l'histoire de la vie ». Plus précisément, elle considérait que la synthèse qu'avait effectuée Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) pourrait être interprétée comme ayant consisté à « harmoniser la base matérielle de l'évolution » (« *aligning the material basis of evolution* ») – c'est-à-dire « les gènes, disposés de manière linéaire sur les supports matériels de l'hérédité, les chromosomes » (« *the gene, arrayed in linear fashion on the material carriers of heredity, the chromosomes* ») – avec les différentes causes évolutives, notamment la sélection naturelle, conçue, par ce même biais, comme étant une cause physico-mécanique, et non pas comme étant un agent intentionnel (« *purposive agent* ») (Smocovitis 1992, p. 20-22). En conséquence, dans une telle perspective, ce seraient précisément cette harmonisation de la base matérielle de l'évolution et de ses causes mécaniques, ainsi que l'établissement d'un *continuum* entre les phénomènes micro-évolutifs et les phénomènes macro-évolutifs qui auraient permis aux architectes de la Synthèse Moderne, et notamment à Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970), de conceptualiser l'évolution organique sous la forme d'un processus dynamique, dont la sélection naturelle serait l'une des causes principales. Il en découle qu'une telle vision de l'évolution aurait elle-même été une conséquence des contraintes que les principes et les modèles de la génétiques des populations ont exercées, comme nous l'avons affirmé dans le chapitre précédent, sur l'élaboration de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel. Cette conclusion est, d'ailleurs, étayée par la manière dont Smocovitis (1992, 1996) a interprété la fonction épistémique du principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908). À son avis, en tant que description mathématique d'un état d'équilibre polymorphe, ce dernier aurait, justement, fourni aux architectes de la Synthèse Moderne un principe analogue à la première loi de la dynamique de Newton (1687)⁴⁰⁷. Cela découlerait du fait que, d'après le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908)

⁴⁰⁷ « Si un objet, livré à lui-même, n'est pas perturbé [*'is not perturbed'*] [c'est-à-dire si la résultante des forces qui l'affectent est nulle], il continue de se déplacer avec une vitesse constante en ligne droite [*'with a constant velocity in a straight line'*] s'il était initialement en mouvement [*'if it was originally moving'*], ou continue de rester au repos s'il était au repos initialement [*'it continues to stand still if it was just standing still'*] » (Feynman, Leighton & Sands 1964 ; 1999, p. 116).

tout comme d'après les lois du mouvement de Newton, il ne peut y avoir de changement évolutif sans l'action des causes du changement évolutif. Il faudrait donc concevoir le changement évolutif selon les modèles du changement physique [*'Evolutionary change would thus be constructed on models of physical change'*], si bien que l'évolution présenterait des régularités analogues aux lois de la physique newtonienne [*'evolution would demonstrate law-like regularities analogous to the law-like regularities of Newtonian physics'*] » (Smocovitis 1992, p. 23).

Ainsi interprété, le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) ne représente donc pas seulement, comme nous l'avons vu plus haut, un modèle nul pour la génétique, dite « classique », des populations, à partir duquel il est possible de dériver d'autres modèles, qui décrivent les modalités d'action des différents facteurs évolutifs, qu'ils agissent isolément ou en combinaison les uns avec les autres. Bien au contraire, il constitue également une sorte de loi dynamique décrivant l'« état de force nulle » (« *zero-force state* ») (Sober 1984a) de l'évolution, ou du moins de l'évolution génotypique. Mais en quoi consisterait, plus concrètement, une loi d'état de force nulle et que comporterait l'application d'un tel concept à la reconstruction du cadre de la théorie synthétique de l'évolution ? En quoi pourrait-il nous permettre de formaliser la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel génétiquement fondé, sous la forme d'une théorie des forces évolutives dont le principe le plus abstrait serait, comme le suggérait Gayon (2004), le principe de sélection naturel en tant que « schématisme à caractère nomologique » ?

Afin de répondre à toutes ces questions, nous verrons, dans un premier moment (section 2.3.1), en quoi consiste l'interprétation de la théorie de l'évolution par sélection naturelle en tant que « théorie des forces » (« *theory of forces* ») qu'a proposée Elliott Sober (1984a). Plus précisément, nous verrons en quoi, à partir d'une analyse des arguments de Darwin (1859), Sober (1984a) est parvenu à une conception de la théorie synthétique de l'évolution comme raffinement de la théorie darwinienne originaire. Un tel raffinement se serait donc opéré par l'introduction de nouvelles lois – et notamment de nouvelles lois-conséquences visant à décrire les effets de la sélection naturelle et d'autres facteurs évolutifs sur la composition génétique des populations – qui auraient permis d'éclairer d'autres aspects de l'évolution en tant que processus dynamique. Nous en concluons, par conséquent, que la lecture du principe de sélection naturelle que nous livre Sober (1984a) est cohérente avec une interprétation de ce même principe comme étant un schématisme à caractère nomologique et dynamique, ce qui nous amènera à nous poser la question de savoir si la conception classique des théories scientifiques pourrait servir de modèle pour l'élaboration d'une interprétation analogue à celle de Sober (1984a). C'est pourquoi nous nous pencherons, par la suite, sur une alternative naturelle à l'axiomatisation de Ruse (1973), qui s'inscrit tout de même dans la droite ligne

de la conception classique, c'est-à-dire l'axiomatisation qu'ont proposée Mary B. Williams (1970) et Alexander Rosenberg (1985). Nous verrons, ainsi, en quoi ces deux auteurs se sont inspirés de Darwin (1859) pour donner une formulation abstraite et mathématisée du principe de sélection naturelle, qui repose sur un certain nombre de concepts et d'outils issus de la théorie des ensembles partiellement ordonnés et de la théorie des graphes. Il s'agit, notamment, des concepts de biocosme, de clan, de *subclan* et de génération, qui sont de nature à la fois populationnelle et généalogique. De tels concepts permettent, en effet, de concevoir l'évolution comme étant un processus d'expansion ou de rétrécissement – en fonction de leurs valeurs sélectives respectives – de populations, d'un point de vue spatial, et de lignée, d'un point de vue temporel. Nous verrons, en outre, en quoi il s'agit de concepts très généraux, qui peuvent s'appliquer aussi bien au niveau des génotypes qu'à celui des organismes ou à celui des espèces. C'est précisément leur généralité qui fait en sorte que l'on puisse s'en servir pour justifier des explications par analogie qui passent d'un niveau à l'autre. En outre, on retrouve le même niveau de généralité dans les axiomes qui définissent ces termes primitifs, si bien que de tels axiomes constituent le socle du volet plus proprement darwinien de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), en ceci qu'ils permettent de donner une représentation des processus biologiques fondamentaux qui la sous-tendent.

Nous verrons, par la suite (section 2.3.2), en quoi consistent les cinq axiomes darwiniens que proposent Williams (1970) et Rosenberg (1985), que nous subdiviserons, d'emblée, en deux groupes. Le premier groupe se compose des axiomes D_1 , D_2 et D_3 , qui constituent ce que nous appellerons le volet statique du système : le premier introduit le terme primitif « *subclan* darwinien », le second pose le principe de l'existence d'un nombre maximum d'effectifs pour chaque *subclan*, alors que le troisième permet d'introduire le concept de valeur sélective, ou de *fitness*, que Williams (1970) et Rosenberg (1985) considéraient comme étant un terme primitif, dont on ne saurait donner qu'une définition informelle et opérationnelle. L'autre groupe, qui contient les axiomes D_4 et D_5 , forme, en revanche, le volet dynamique de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985). L'axiome D_4 affirme, en effet, que si (1) tout *subclan* darwinien, D , contient un *subclan* – c'est-à-dire une partie d'un *subclan* – D_1 , et (2) D_1 garde, pendant un nombre suffisamment important de générations, une valeur sélective qui est supérieure à celle des autres parties de D , alors le poids de D_1 au sein de D va croître, jusqu'à ce que D_1 ne parvienne à se fixer. Quant à l'axiome D_5 , il affirme que tant qu'il existe des différences de valeur sélective entre les parties dont se compose un *subclan* donné, l'une de ces mêmes parties tendra à croître aux dépens des autres, et cela précisément en raison de son avantage sélectif, pourvu que le *subclan* en question ne soit pas au bord de l'extinction. Après avoir analysé les liens logiques qui existent entre ces différents axiomes, nous en concluons que l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) constitue un exemple d'approche

syntactique de la théorie de l'évolution qui s'écarte du modèle que représente la conception classique des théories scientifiques, en ceci qu'elle ne comporte la définition d'aucun postulat de correspondance entre des termes théoriques tels que « clan », « *subclan* », ou encore « *fitness* », et une quelque classe de termes observationnels. En tant que telle, cette axiomatisation nous permet ainsi d'envisager le principe de sélection naturelle comme étant un schématisme à caractère nomologique et dynamique, mais elle fait l'impasse sur les fondements génétiques de ce dernier. Nous émettrons, par conséquent, l'hypothèse que l'absence de génétique qui caractérise l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) découlerait du fait que cette dernière ne ferait qu'exacerber l'une des caractéristiques fondamentales de la conception classique des théories scientifiques. Cette caractéristique de la conception classique consisterait, plus précisément, en ceci que les concepts théoriques des sciences empiriques y sont envisagés comme étant des concepts ouverts, dont la signification ne saurait être fixée une fois pour toutes. Cette vision de la nature des concepts scientifiques implique, en retour, une conception des théories scientifiques comme boîtes noires qui produisent un certain *output* (des prédictions ou des explications) en fonction d'une quantité donnée d'*inputs* (des données observationnelles ou expérimentales). Nous analyserons, par conséquent, les problèmes que soulève une telle conception, ce qui nous amènera également à nous interroger sur l'importance des modèles analogiques pour la compréhension des théories et des concepts scientifiques et à formuler, en conclusion, la question suivante : En quoi les problèmes que nous avons relevés dans l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) nous obligeraient-ils à en conclure que la conception classique ne constitue pas un modèle pertinent pour la reconstruction formelle de la théorie synthétique ?

2.3.1 Le principe de sélection naturelle est-il un schématisme à caractère nomologique et dynamique ?

Tel que l'a défini, par exemple, Elliott Sober (1984a), le concept de loi d'état de force nulle s'inscrit dans le cadre d'une « théorie des forces » (« *theory of forces* »), au sens général du terme, c'est-à-dire d'une théorie qui vise à décrire les « *causes possibles* » (« *possible causes* ») (Sober 1984a, p. 27) des phénomènes qui constituent son domaine d'application, afin de mieux en identifier les causes effectives. Plus précisément, une théorie des forces rend compte de la manière dont tel ou tel système physique « évoluera s'il se trouve, au début, dans un certain état initial et s'il est sujet à certaines influences causales au cours de son chemin » (« *will evolve if it begins in a certain initial state and is subject to certain causal influences along the way* ») (Sober 1984a, p. 27). Pour ce faire, elle repose sur le présupposé que l'on puisse modéliser les causes qui déterminent la dynamique du

système en question par analogie avec les forces de la mécanique newtonienne, c'est-à-dire comme s'il s'agissait de modifications quantitatives de quelques paramètres fondamentaux, permettant de définir les éléments dont se constitue le système en question, qui seraient la conséquence des interactions entre ces mêmes éléments. Il en découle que la tâche d'une théorie des forces consiste à identifier, justement, toutes les forces qui pourraient agir sur un système donné, ainsi qu'à décrire les conditions qui les produisent, la façon dont elles affectent l'état du système lui-même et la manière dont elles se combinent les unes avec les autres. Dans un tel cadre, une loi d'état de force nulle n'est donc rien d'autre qu'une loi qui décrit la manière dont tel ou tel système physique – ou, dans le cas de l'interprétation que Sober (1984a) a donnée de la théorie de l'évolution en tant que théorie des forces, de telle ou telle population – se modifie lorsque son état ne subit aucune perturbation. Par conséquent, tout comme la loi qui décrit le comportement d'un système mécanique sur lequel n'agit aucune force, c'est-à-dire la loi d'état de force nulle de la mécanique newtonienne, est le principe d'inertie (qui nous dit que le système en question demeurera dans un état de repos ou de mouvement de translation uniforme), la loi qui décrit la manière dont variera la composition génétique d'une population qui n'est sujette à aucun facteur évolutif, et donc la loi de force nulle de la génétique des populations en tant que fondement génétique de la théorie synthétique de l'évolution, est précisément le principe de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) (Sober 1984a, p. 32)⁴⁰⁸. Cela implique que, lorsqu'on l'envisage d'une telle manière, ce principe nous permet de concevoir la sélection naturelle non seulement comme étant un mécanisme de variation des fréquences génotypiques (ou géniques), mais également comme étant une force, au sens newtonien du terme. Par ce même biais, il nous permet aussi de concevoir le principe de sélection naturelle non seulement comme étant un principe du « calcul » de la génétique des populations, mais également comme étant une « loi-conséquence » (« *consequence law* ») (Sober 1984a, p. 50), c'est-à-dire un principe dynamique hautement abstrait. Une loi-conséquence n'est, en effet, rien d'autre qu'« une loi qui décrit la manière

⁴⁰⁸ Il faut, néanmoins, ajouter que Sober (1984a) a également présenté une possible alternative, de portée plus générale, à la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) en tant que loi d'état de force nulle de la théorie de l'évolution, qu'il a empruntée à Motoo Kimura (1983) : « Le fait que les fréquences géniques ne changent pas en l'absence de facteurs perturbateurs [*'without disturbing factors'*] est une évidence, sans que l'on doive faire des calculs, dès que nous remarquons que les gènes homologues qui sont portés par les chromosomes ségrégent régulièrement lors de la méiose et que les gènes sont des entités qui s'autoreproduisent [*'as soon as we note that homologous genes on the chromosomes segregate regularly at meiosis and that genes are self-reproducing entities'*]. Nous tendons à oublier que la formation des génotypes (zygotes) consiste tout simplement à grouper des gènes homologues par deux [*'grouping by two of homologous genes'*]. Il se trouve que les organismes supérieurs, y compris nous-mêmes, possèdent une phase diploïde bien développée [*'a well-developed diploid phase'*]. Personne ne prêterait attention à la loi de Hardy-Weinberg si nous, les humains, étions des organismes haploïdes » (Kimura 1983, p. 7 ; cité par Sober 1984a, p. 36).

dont les forces agissent, quelle que soit leur origine », et qui « survient », par conséquent, sur les causes particulières des forces en question (Gayon 2004, p. 10). En cela, elle s'oppose à une « loi-source » (« *source law* ») (Sober 1984a, p. 50), c'est-à-dire, précisément, à une loi qui « décrit la manière dont un certain type de force (par exemple la force de gravitation, ou la force électrostatique) est engendrée » (Gayon 2004, p. 10)⁴⁰⁹, quoique ces deux types de lois soient également nécessaires afin de décrire l'évolution d'un système donné⁴¹⁰. Il en découle que, si nous souhaitons à la fois résoudre la contradiction que nous avons évoquée plus haut et nous servir des contributions que Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970) a apportées à l'élaboration de la théorie synthétique dans le but de proposer une formalisation de cette dernière, en tant que cadre conceptuel, qui soit modelée sur le paradigme de la conception classique des théories scientifiques, nous devons nous poser la question suivante : En quoi serait-il possible de formaliser la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel génétiquement fondé, sous la forme d'une théorie des forces évolutives dont le principe le plus abstrait serait, comme le suggérait Gayon (2004), le principe de sélection naturelle en tant que « schématisation à caractère nomologique » ?

⁴⁰⁹ « La loi classique de la gravitation est une loi-source [*The classical law of gravitation is a source law*] ; elle affirme que, lorsque deux objets d'une *masse* donnée sont séparés par une *distance* donnée, il y aura une force gravitationnelle d'une intensité donnée qui s'engendrera entre eux [*when two objects of given mass are separated by a given distance, there will be a gravitational force of a given magnitude*]. La loi de Coulomb en est un autre exemple : elle affirme que, lorsque deux objets dotés d'une *charge* donnée sont séparés par une *distance* donnée, il y a une force électrique d'une certaine intensité qui s'engendre entre eux [*when two objects of given charge are separated by a given distance, an electrical force of a certain magnitude exists*]. Les lois-sources décrivent les circonstances physiques qui engendrent certains types de forces [*Source laws describe the physical circumstances that generate particular kinds of forces*]. Une 'loi-conséquence' [*A 'consequence law'*] décrit, comme le suggère le nom, ce qui découle de la présence ou de l'absence des forces [*what follows from the presence or absence of forces*]. La loi ' $F = ma$ ' en est l'exemple classique. Elle affirme que des objets d'une masse donnée accélèrent quand et seulement quand ils sont sujets à une résultante nette de forces [*objects of fixed mass accelerate when and only when they are subject to a net force*]. Aucune mention n'est faite ici des conditions physiques qui produisent les forces, mais il est uniquement question de ce que font les forces, une fois qu'elles existent [*what forces do, once they exist*] (Sober 1984a, p. 50).

⁴¹⁰ « Les lois-sources et les lois-conséquences se combinent dans le but de prévoir les changements qui auront lieu dans un système qui est sujet à un certain ensemble de forces [*combine to predict the changes that will occur in a system that is subjected to a set of forces*]. Les lois-sources nous permettent de calculer l'intensité de la force gravitationnelle, de la force électrique, et les intensités des autres forces qui s'appliquent sur un objet [*the values of the other forces that impinge on an object*]. Chacune d'entre elles est une composante de la force totale [*component force*]. Dans ' $F = ma$ ', l'on peut remplacer F par chacune d'entre elles, afin de calculer la valeur de la composante de l'accélération qu'elle induit [*to calculate the component of acceleration it induces*]. Après, l'on utilise une loi pour combiner les différentes composantes de la force totale [*a law for combining component forces*]... afin de calculer la résultante nette [*to calculate the net force*] (Sober 1984a, p. 50).

Pour répondre à une telle question, nous devons avant tout remarquer qu'Elliott Sober (1984a) a lui-même développé une présentation de la théorie de l'évolution comme théorie des forces que nous pouvons résumer ainsi. Dans une telle perspective, Darwin (1859) aurait tâche d'expliquer la distribution particulière des caractéristiques phénotypiques que l'on peut observer dans le monde vivant en établissant deux hypothèses complémentaires. La première serait ce qu'on pourrait appeler « l'hypothèse de l'évolution », en tant que « descendance avec modification d'un ancêtre commun » (« *descent with modification from a common ancestor* »), qui viserait précisément à fournir une explication directe de la distribution observée des caractéristiques. La seconde serait l'hypothèse de la sélection naturelle, dont le but consisterait, comme le remarquait également Gayon (2004), à rendre compte de l'hypothèse de l'évolution à un niveau d'abstraction encore plus élevé. Telle que la présentait Sober (1984a), cette hypothèse stipule que « si les organismes dont se compose une population donnée diffèrent quant à leur capacité à survivre et à se reproduire [*differ in their ability to survive and reproduce*'], et si les caractéristiques qui affectent ces mêmes capacités sont transmises des parents à leur progéniture [*the characteristics that affect these abilities are transmitted from parents to offspring*'], alors la population évoluera » (Sober 1984a, p. 21-22). À son tour, poursuivait Sober (1984a) il serait également possible de décomposer l'hypothèse de la sélection naturelle en deux volets. Premièrement,

il y a la caractérisation générale des conditions qui sont nécessaires pour qu'ait lieu l'évolution par sélection naturelle [*the general characterisation of the conditions required for evolution by natural selection*']. Deuxièmement, il y a l'hypothèse historique qui affirme que ces conditions se sont effectivement réalisées [*that those conditions obtained*] et que la sélection naturelle des organismes a été la principale force qui a dirigé l'évolution de la vie, y compris l'origine des espèces [*the natural selection of organisms has been the principal force governing the evolution of life, including the origin of species*'] (Sober 1984a, p. 23).

Les arguments de Sober (1984a) témoignent ainsi du fait qu'il serait tout à fait possible de concevoir le principe de sélection naturelle comme étant, justement, une loi dynamique au sens newtonien du terme, c'est-à-dire comme étant une loi qui rendrait compte du changement d'état d'un système en identifiant les forces qui y agissent. Plus précisément, Sober (1984a) lui-même qualifiait une telle loi de « principe général darwinien » (« *Darwinian general principle* ») et le formulait de la manière suivante :

Si les organismes d'une population donnée qui possèdent une certaine caractéristique [*a population that possess one characteristic*'] (appelons-la *F*) sont plus aptes à

survivre, et à se reproduire, que les organismes qui possèdent la caractéristique alternative [*the organisms with the alternative characteristic*] (non- F) et si F et non- F sont transmis d'une génération à l'autre, alors la proportion d'individus qui possèdent la caractéristique F augmentera [*the proportion of individuals with characteristic F will increase*] (Sober 1984a, p. 27).

Ce principe constitue, par conséquent, une loi dynamique idéalisée qui décrit l'évolution d'une population d'organismes, en tant que système biologique, sous l'action causale de la sélection naturelle, conçue comme étant une force newtonienne. En tant que tel, il nécessite donc d'être complété par des preuves historico-empiriques qui précisent les conditions initiales et les conditions limites qui sont nécessaires pour que l'on puisse déterminer la dynamique du système en question.

C'est précisément à partir de ces prémisses que Sober (1984a) pouvait donc envisager ce que nous avons appelé « la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel » comme étant le résultat d'un processus de raffinement d'un tel principe darwinien général, par l'introduction de nouvelles influences causales (à savoir, notamment, la mutation, la dérive génétique et la migration) et, plus généralement, par la formulation d'une théorie des fondements génétiques de l'évolution elle-même. Plus précisément, Sober (1984a) allait jusqu'à affirmer que la théorie synthétique formerait une théorie des forces à part entière, puisque structure se composerait, en effet, des trois éléments qui caractérisent toute théorie des forces. Premièrement, comme nous l'avons vu plus haut, elle comporte la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908) en tant que possible loi d'état de force nulle de la génétique des populations, ou de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution (Sober 1984a, p. 31-38). Deuxièmement, elle contiendrait également une classe de lois-conséquences, qui ne seraient rien d'autre que les différents modèles de la génétique des populations, dont la fonction consiste, comme nous l'avons vu plus haut, à quantifier l'influence de chaque force évolutive sur la variation de la composition génétique d'une population donnée (Sober 1984a, p. 59)⁴¹¹. Troisièmement, elle permettrait également de formuler une classe de lois-sources, à savoir des principes généraux qui permettent de relier entre eux une multiplicité de modèles qui expliquent la manière dont les différentes caractéristiques morphologiques, physiologiques et comportementales

⁴¹¹ « Alors que c'est surtout l'écologie qui tâche de fournir des lois-sources pour la sélection naturelle, les lois-conséquences qui la concernent relèvent principalement de la génétique des populations. Du point de vue des équations de la génétique des populations, peu importe *pourquoi* une certaine population est caractérisée par un certain ensemble de coefficients de sélection, de taux de mutation, de taux de migration, etc... [*It doesn't matter to the equations in population genetics why a given population is characterized by a set of selection coefficients, mutation and migration rates, etc.*]. Richard Lewontin a appelé la génétique des populations la 'mécanique automobile' de la théorie de l'évolution [*the 'auto mechanics' of evolutionary theory*] » (Sober 1984a, p. 59).

des organismes peuvent déclencher des processus de sélection. En ce qui concerne la sélection naturelle, précisait Sober (1984a), les lois-sources qui en décrivent les conditions de possibilité « font souvent partie du domaine de l'écologie théorique » (« *often are part of the subject matter of theoretical ecology* ») – comme en témoigne la manière dont Fisher (1930) a expliqué l'ubiquité du sexe-ratio 1 :1 dans le monde vivant⁴¹² – et leur fonction consiste à relier la *fitness* à d'autres propriétés « survenantes » (« *supervenient* »). (Sober 1984a, p. 59), c'est-à-dire avec d'autres propriétés biologiques qui « ne peuvent pas être identifiées avec une seule et même propriété physique donnée » (« *cannot be identified with any single physical property* ») – c'est-à-dire qui ne se réduisent pas à telle ou telle propriété non-biologique – et qui sont telles que « deux systèmes qui sont physiquement identiques doivent tous les deux posséder ou ne pas posséder la propriété en question » (« *two systems that are physically identical must both have or both lack the property in question* ») (Sober 1984a, p. 48). En conséquence, nous pouvons résumer notre lecture de la conception de la théorie de l'évolution, en tant que théories des forces, qu'a défendue Sober (1984a) par le biais du tableau ci-dessous :

⁴¹² « L'explication que Fisher a donnée du sexe-ratio établit une loi-source pour la force de sélection naturelle [*'a source law for the force of natural selection'*]. Elle décrit un certain type de condition qui engendre une certaine sorte de pressions de sélection [*'a kind of condition that generates selection pressures of a certain sort'*]. Son argument montre en quoi le sexe-ratio d'une population donnée peut créer des pressions de sélection pour et contre différentes stratégies reproductives possibles [*'selection pressures for and against various possible reproductive strategies'*]. Remarquez que la théorie du sexe-ratio aborde la question des stratégies reproductives à un niveau de généralité très abstrait [*'at a very abstract level of generality'*] » (Sober 1984a, p. 58).

	Loi d'état de force nulle	Lois-conséquences	Lois-sources	Concept de sélection naturelle
La théorie de l'évolution comme théorie des forces (Sober 1984a)	Principe de Hardy-Weinberg	Modèles de la génétique des populations qui quantifient l'influence de chaque force évolutive sur la variation de la composition génétique d'une population donnée	Principes relevant du domaine de l'écologie théorique qui relient la valeur sélective à d'autres propriétés survenantes	Force dont les causes se situent au niveau phénotypique (différences de valeur sélective) et dont les effets se mesurent au niveau génotypique (différences de fréquences relatives)

Cela dit, est-ce que la conception classique des théories scientifiques constituerait, justement, un modèle pertinent pour formuler une représentation du principe de Darwin (1859) en tant que loi, ou en tant que schématisme à caractère nomologique, qui relève d'une dynamique de l'évolution, dans la même veine des arguments de Sober (1984a) et de Gayon (2004) ?

Afin de répondre à une telle question, nous pouvons prendre en considération une alternative naturelle à la formalisation de Ruse (1973), qui permet, justement, d'envisager le principe de sélection naturelle comme étant un schématisme hautement abstrait, c'est-à-dire l'« axiomatisation naïve, plus proche du style des axiomatisations d'Euclide et de Newton que de celui des axiomatisations formelles de l'école de Russell et Whitehead » (« *naive axiomatization, closer in style to the axiomatizations of Euclid and Newton than to the formal axiomatizations of the Russell-Whitehead school* ») (Williams 1973a, p. 85), de la théorie de l'évolution qui a été proposée par Mary B. Williams (1970, 1973a, 1973b, 1980, 1982) et successivement reprise par Alexander Rosenberg (1985). Plus précisément, il s'agit d'une alternative naturelle à l'axiomatisation de Ruse (1973) pour la simple raison que Williams (1970, 1973a, 1973b, 1980, 1982) et Rosenberg (1985) partaient des mêmes présupposés que ceux qui sous-tendaient la démarche de ce dernier, en ceci qu'ils s'inscrivaient, eux aussi, en faux contre l'idée reçue que la théorie de l'évolution serait essentiellement différente des théories physiques ou chimiques, telle la mécanique newtonienne. Il estimaient, en effet, que les différences que l'on peut identifier entre la première et les secondes ne seraient que « des différences historiques relativement transitoires » (« *relatively transient historical differences* »), ou bien des différences qui découlent de « la complexité nettement plus grande des phénomènes biologiques en comparaison avec celle des phénomènes mécaniques » (« *the sheer greater complexity of biological phenomena as compared to mechanical phenomena* ») (Rosenberg 1985, p. 122-123). En usant d'une métaphore historico-biologique, Williams (1980) estimait, notamment, que la théorie de l'évolution serait une théorie « en métamorphose », qui ne se trouverait qu'« au seuil de la maturité structurelle » (« *hovering on the brink of structural maturity* ») (Williams 1980, p. 386), si bien que l'on pourrait supposer que, lorsqu'elle murirait, il deviendrait évidente que – loin de posséder des propriétés « singulières » (« *peculiar* ») – « la structure de la théorie de l'évolution est celle d'une théorie axiomatique et déductive, qui permet de formuler des explications nomologico-déductives et des prédictions falsifiables » (« *the structure of evolutionary theory is that of a deductive axiomatic theory, with deductive-nomological explanations and falsifiable prediction* ») (Williams 1980, p. 386)⁴¹³. Autrement dit, tout comme Ruse (1973), Williams (1970,

⁴¹³ Plus précisément, Williams (1980) définissait la théorie de l'évolution comme étant « une théorie qui n'est pas à mesure d'homme » (« *non-human-sized theory* ») (Williams 1980, p. 390), c'est-à-dire comme étant une théorie qui n'a « aucune application significative à l'échelle de l'homme » (« *no significant human-size instantiations* »), en ceci qu'elle

1973a, 1973b, 1980, 1982) et Rosenberg (1985) se tournaient vers la conception classique des théories scientifiques pour en déduire une sorte de critère visant à déterminer en quoi consiste la structure d'une véritable théorie scientifique, dans le but de contribuer au développement de la théorie de l'évolution, en montrant la façon dont il serait possible de la reconstruire, justement, sous la forme d'un système axiomatique formalisé *stricto sensu*. Néanmoins, contrairement à Ruse (1973), l'objet de leur reconstruction n'était pas directement la théorie synthétique de l'évolution telle que nous l'avons définie dans le chapitre précédent, c'est-à-dire en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, génétiquement fondé, qui est issu de la Synthèse Moderne. En revanche, ils s'intéressaient exclusivement à « la théorie de l'évolution de Darwin » (« *Darwin's theory of evolution* »), c'est-à-dire à cette « partie de la théorie moderne de l'évolution pour laquelle Darwin a fourni tous les principes explicatifs essentiels » (« *part of the present theory for which Darwin provided all of the crucial explanatory principles* »), qui n'est rien d'autre que « la théorie de l'anagenèse, ou de la descendance avec modification adaptative [à partir d'un ancêtre commun] » (« *the theory of anagenesis, or descent with adaptive modification* ») (Williams 1970, p. 344). Un tel choix était dicté par le fait qu'aussi bien Williams (1970) que Rosenberg (1985) considéraient que ce serait une telle théorie, et non pas la théorie génétique de l'évolution que l'on peut reconstruire à partir de la génétique mendélienne et de la génétique (théorique) des populations, qui constituerait le véritable

ne porte généralement pas sur « des entités et des processus dont les organes de perception humains font une expérience directe » (« *entities and processes that are directly experienced by human perceptual organs* ») (Williams 1980, p. 389). Williams (1980) ajoutait que, en tant que théorie qui n'est pas à mesure d'homme, la théorie de l'évolution aurait donc été contrainte de se développer sur la base d'« hypothèses définitoires » (« *definition-like hypotheses* ») au sujet des relations entre, d'une part, « des entités... et des processus dont les hommes peuvent faire l'expérience » (« *humanly experienced entities... and processes* »), comme les organismes, et, d'autre part, « des entités... et des processus qui ne sont pas à l'échelle de l'homme » (« *some non-human-sized entities* »), tels les espèces et les processus macro-évolutifs (Williams 1980, p. 390). Dans cette perspective, ce serait précisément en raison d'une telle asymétrie entre les termes que définissent des hypothèses de cette nature que des philosophes tels que Beckner (1959), Goudge (1961), Smart (1963) ou Hempel (1965) ont pu affirmer que « la théorie de l'évolution n'avait pas de lois » (« *evolutionary theory had no laws* »), que « les concepts évolutifs étaient tellement singuliers que leurs définitions violaient les critères ordinaires de définissabilité » (« *evolutionary concepts were so peculiar that their definitions violated the ordinary standards for definitions* »), que « la théorie de l'évolution n'était pas axiomatisable » (« *evolutionary theory was not axiomatizable* »), etc. (Williams 1980, p. 385). C'est pourquoi Williams (1980) en concluait que, au fur et à mesure que – en mûrissant – la théorie de l'évolution déplacerait son centre d'intérêt d'« entités et [de] processus dont on peut faire une expérience directe » (« *the directly experienced entities and processes* ») vers des « entités [et] des processus dont l'existence fait l'objet d'hypothèses » (« *hypothesized entities and processes* »), elle subirait un processus de métamorphose qui aboutirait, justement, à une mise en forme tout à fait analogue à celle qui caractérise les théories physiques (Williams 1980, p. 390).

fondement de ce que nous avons appelé, justement, « la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie »⁴¹⁴.

Nous pouvons donc en conclure que, tout en « suivant la même allégeance épistémologique » (Duchesneau 1997, p. 330) que Michael Ruse (1973) – c’est-à-dire tout en prenant modèle sur la conception classique des théories scientifiques – Williams (1970, 1973a, 1973b, 1980, 1982) et Rosenberg (1985) ont fini par proposer un programme d’axiomatisation et de formalisation de la théorie de l’évolution qui est alternatif, en ceci qu’il se focalise sur le principe darwinien de sélection naturel. C’est pourquoi nous pouvons considérer que la première étape d’un tel programme consiste précisément à extraire la substantifique moëlle de ce même principe, en le résumant aux six énoncés suivants :

1/ Le nombre d’organismes de chaque type est susceptible de croître suivant une progression géométrique [*‘increase in geometrical proportions’*]; 2/ le nombre d’organismes d’un type donné tend à se maintenir à un niveau stable pour de longues périodes [*‘remain close to constant over long periods’*]; 3/ les organismes se trouvent individuellement différenciés [*‘no two individual members of a type of organism are identical’*] et sont sujets à variations, certaines de ces variations peuvent se transmettre de façon héréditaire... 4/ Parce que les organismes produisent

⁴¹⁴ Plus précisément, Rosenberg (1985) a présenté trois arguments à l’appui de cette thèse, qui sont, respectivement, de nature logico-épistémologique, de nature historique et de nature ontologique. D’un point de vue logico-épistémologique, Rosenberg (1985) observait que, bien qu’il soit vrai que la théorie de Darwin (1859), en tant que « théorie de la sélection naturelle » (« *natural-selection theory* »), nécessite une théorie de l’hérédité telle que celle de Mendel (1866), il n’en demeure pas moins vrai que la fonction de cette dernière consiste précisément à expliquer « comment les traits phénotypiques sont transmis d’une génération à l’autre, *sans changements*, de sorte qu’ils puissent continuer à exister dans une population donnée » (« *how traits are passed on, unchanged, so that they may continue to exist in a population* ») (Rosenberg 1985, p. 133). C’est pour une telle raison que, d’après Rosenberg (1985), la génétique mendélienne et la génétique des populations constitueraient non pas le noyau conceptuel de la théorie de l’évolution, mais son arrière-plan. D’un point de vue historique, il rappelait que « les premiers tenants de la théorie génétique mendélienne [*‘the earliest exponents of Mendelian genetic theory’*] considéraient que les conséquences de cette dernière étaient incompatibles avec la théorie de la sélection naturelle elle-même [*‘incompatible with the theory of natural selection itself’*] » (Rosenberg 1985, p. 132). D’un point de vue ontologique, il reprenait à son compte la critique que Beatty (1980a) avait précédemment adressée à Ruse (1973), en remarquant que les lois de Mendel (1866) présupposent l’existence d’un mécanisme méiotique physiologiquement normal, c’est-à-dire d’un processus biologique dont il est possible de donner une explication évolutive en faisant l’hypothèse que « les gènes qui provoquent une méiose normale disposent d’une stratégie visant leur propre transmission d’une génération à l’autre qui est plus adaptative que celle des gènes qui causent la non-disjonction des chromosomes » (« *the genes that result in normal meiosis provide a more adaptive strategy for their own transmission from generation to generation than those that produce nondisjunction* ») (Rosenberg 1985, p. 134-135).

plus de descendants qu'il n'en peut survivre, une lutte pour l'existence est la règle [*there must be a struggle among organisms to survive*']; 5/ Dans cette lutte, survivent ceux qui comportent des variations adaptatives par rapport aux conditions du milieu externe [*the ones whose variations best adapt them to their surroundings*'] – ce sont le plus aptes [*the fittest*'] – alors que les autres moins bien adaptés [*the less fit organisms*'] sont éliminés ; 6/ Parce que certaines variations font l'objet de transmission héréditaire [*are heritable*'], il y aura changement de la proportion des organismes porteurs de telles variations adaptatives au fil des générations [: il y aura évolution] [*there will be a change in the proportions of the variations from generation to generation : There will be evolution*'] (Rosenberg 1985 ; Duchesneau 1997, p. 331).

L'étape successive consiste, en conséquence, à « organiser » (« *organize* ») ces six énoncés fondamentaux, qui ont été « dérivés de l'expérience » (« *derived from experience* »), dans « un système au sein duquel on [peut] déduire des lois, connues et jusqu'ici inconnues, qui prédisent les données » (« *a deductive system in which known and theretofore unknown laws which predicted the data could be derived* »), c'est-à-dire, précisément, de les axiomatiser sur le modèle de la mécanique newtonienne (Williams 1970, p. 344-345). Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier trois composantes fondamentales : premièrement, il faut déterminer, parmi ces six énoncés, ceux qui sont les plus fondamentaux, afin de les reformuler sous la forme d'axiomes (Williams 1970, p. 345) ; deuxièmement, il faut identifier « les concepts les plus fondamentaux de la théorie » (« *the most fundamental concepts of the theory* »), dans le but de les exprimer par le biais de « termes primitifs » (« *primitive terms* »), c'est-à-dire par le biais de symboles qui sont acceptés « sans définition » (« *without definition* ») – non pas parce qu'ils dénotent des concepts qui sont « intuitivement absolument clairs » (« *intuitively crystal clear* »), mais « parce qu'il est logiquement impossible de définir quelque chose sans utiliser d'autres termes dans la définition » (« *because it is logically impossible to define something without using other words in the definition* ») (Williams 1970, p. 346) ; troisièmement, il faut définir la classe des domaines d'application d'un tel système axiomatique, c'est-à-dire la classe de tous les ensembles qui possèdent les mêmes propriétés formelles que celles qui caractérisent « l'ensemble des organismes reproducteurs sur lesquels agit la sélection naturelle » (« *the set of reproducing organisms on which natural selection works* ») et que Williams (1970) elle-même appelait des « biocosmes » (« *biocosms* ») (Williams 1970, p. 346). Ces trois composantes sont étroitement liées les unes aux autres, car les termes primitifs, tels que les termes « *entité biologique* » (« *biological entity* ») (c'est-à-dire « organisme ») et « *est un parent de* » (« *is a parent of* »), dénotent les éléments qui appartiennent aux biocosmes, les propriétés qu'ils possèdent, ou encore les relations qu'ils entretiennent, tandis que « les axiomes [de la théorie darwinienne

formalisée] sont des énoncés qui portent sur ces [mêmes] termes » (« *the axioms are statements about these terms* ») (Williams 1970, p. 346). Elles forment, par conséquent, le squelette même de la structure logico-syntaxique du système axiomatique qu’ont élaboré Williams (1970) et Rosenberg (1985). Cela dit, en quoi consiste plus précisément une telle structure logico-syntaxique ?

Comme première chose, Williams (1970) déterminait la « structure mathématique » (« *mathematical structure* ») (Williams 1970, p. 346) d’un biocosme – dénoté par le symbole « B » – au moyen de deux axiomes. La fonction du premier consiste, en effet, à définir implicitement les termes « entité biologique » – dénoté par des symboles tels que « b_1 », « b_2 », etc. – et « est un parent de » – dénoté par le symbole « \triangleright » – (Williams 1970, p. 346), en en délimitant les « significations possibles » (« *possible meanings* ») (Williams 1970, p. 348), alors que celle du second est d’énoncer l’une des propriétés fondamentales de la relation « est un ancêtre de » (« *is an ancestor of* ») – dénoté par le symbole « \triangleright » –, (Williams 1970, p. 347), que l’on peut définir (explicitement) de la manière suivante : « $(b_1 \triangleright b_2) \leftrightarrow (b_1 \succ b_2) \vee \exists \{b_3, b_4, \dots, b_{k-1}, b_k\} (b_1 \succ b_3 \succ b_4 \succ \dots b_{k-1} \succ b_k \succ b_2)$ ». Plus précisément,

Axiome B 1 : « $(\forall b_1 \subset B) \sim (b_1 \succ b_1)$ », que l’on peut interpréter, de manière informelle, comme signifiant « aucune entité biologique n’est un parent d’elle-même » (« *no biological entity is a parent of itself* ») (Williams 1970, p. 346).

Axiome B 2 : « $(\forall (b_1, b_2)) [(b_1 \triangleright b_2) \rightarrow \sim (b_2 \triangleright b_1)]$ », que l’on peut interpréter, toujours de manière informelle, comme étant un axiome qui énonce la nature asymétrique de la relation (binaire) de « descendance » (« *ancestry* ») : « si b_1 est un ancêtre de b_2 , alors b_2 n’est pas un ancêtre de b_1 » (« *if b_1 is an ancestor of b_2 , then b_2 is not an ancestor of b_1* ») (Williams 1970, p. 347).

Sur la base de ces deux axiomes, l’on peut en déduire, par la suite, deux propriétés supplémentaires de la relation de descendance, à savoir sa nature irréflexive – « aucune entité biologique n’est son propre ancêtre » (« *no biological entity is its own ancestor* ») – et sa nature transitive – « si b_1 est un ancêtre de b_2 et b_2 est un ancêtre de b_3 , alors b_1 est un ancêtre de b_3 » (« *if b_1 is an ancestor of b_2 , and b_2 is an ancestor of b_3 , then b_1 is an ancestor of b_3* ») (Williams 1970, p. 347-348).

Il en découle que la relation de descendance définit un « ordre partiel strict » (« *strict partial order* ») (Suppes 1960) – c’est-à-dire, précisément, une relation qui est

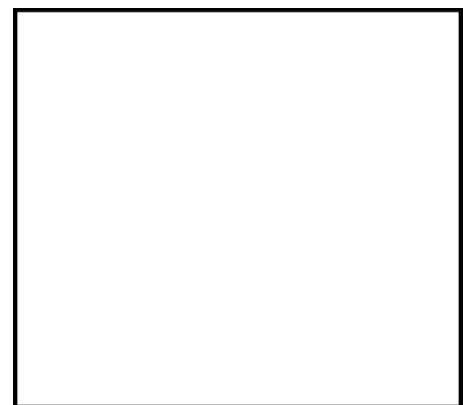
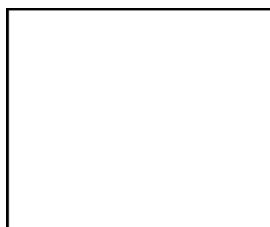


Figure 23 : Graphe orienté acyclique (Thulasiraman & Swamy 1992, p. 100)

irréflexive, asymétrique et transitive – sur tout biocosme donné, si bien que le couple ordonné, (B, \triangleright) , que ce dernier forme avec la relation de descendance elle-même possède non seulement la structure d'un « ensemble strictement partiellement ordonné » (« *strictly partially ordered set* ») (Schmidt 2011 ; Schröder 2016), mais également celle d'un « graphe orienté acyclique » (« *acyclic directed graph* ») (Thulasiraman & Swamy 1992), tel que celui que représente le diagramme à la figure (23)⁴¹⁵. Ce résultat est particulièrement important, car, comme l'observait Williams (1970) elle-même, il permet de jeter « un pont entre la biologie et la mathématique pure » (« *a bridge between biology and pure mathematics* »). En effet, nous pouvons en déduire que tout théorème qui relève de la théorie mathématique de l'ordre partiel strict ou de celle des graphes orientés acycliques est, *ipso facto*, « un théorème qui est vrai au sujet de la relation de descendance » (« *a true theorem about the ancestor relation* »), si bien que la connaissance biologique s'en trouve enrichie (Williams 1970, p. 348). Il en découle que, tout comme les forces newtoniennes en tant que couples « vecteur-point d'application » qui modélisent les causes des variations d'états que subissent les systèmes mécaniques, un biocosme n'est rien d'autre qu'une structure mathématique qui possède un certain nombre de propriétés formelles et qui peut correspondre à différents ensembles d'entités biologiques. De tels ensembles sont, par conséquent, associés à autant d'interprétations possibles, au sens logique du terme, des

⁴¹⁵ Par définition, un « graphe orienté [*directed graph*] $G = (V, E)$ se compose de deux ensembles : un ensemble fini, V , d'éléments appelés *sommets* [*elements called vertices*] et un ensemble fini, E , d'éléments appelés *arêtes* [*elements called edges*]. Chaque arête est associée à un couple ordonné de sommets », à savoir un « *sommet initial* » (« *initial vertex* ») et un « *sommet terminal* » (« *terminal vertex* ») (Thulasiraman & Swamy 1992, p. 97-98). Par exemple, si l'on considère les ensembles $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$ et $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8\}$, tels que $e_1 = (v_1, v_2)$, $e_2 = (v_1, v_2)$, $e_3 = (v_1, v_3)$, $e_4 = (v_3, v_1)$, $e_5 = (v_2, v_4)$, $e_6 = (v_3, v_4)$, $e_7 = (v_4, v_4)$, $e_8 = (v_5, v_6)$, alors le graphe orienté G correspond au graphe qui est représenté à la figure (24) :



(Thulasiraman & Swamy 1992, p. 99). Un graphe de ce type n'est, cependant, pas acyclique. En effet, un graphe orienté « est dit *acyclique* [*acyclic*] s'il ne contient pas de circuits orientés [*directed circuits*] » (Thulasiraman & Swamy 1992, p. 100), c'est-à-dire s'il ne contient aucune séquence finie de sommets – reliés par des arêtes orientées – (v_{i-1}, v_i) , avec $2 \leq i \leq k$, et donc aucune « chaîne orientée » (« *directed path* ») (Thulasiraman & Swamy 1992, p. 100), qui soit telle que $v_1 = v_k$, comme la séquence que forment les arêtes v_1, v_3 et v_1 .

axiomes *B 1* et *B 2*, ainsi que des théorèmes qui en découlent⁴¹⁶. Williams (1970) en énumérait, notamment, trois, qui sont particulièrement importantes car elles permettent d'identifier trois « niveaux » (« *levels* ») (Williams 1970, p. 349) de sélection et d'évolution. Le biocosme « *B* » peut, en effet, désigner « l'ensemble de tous les organismes » (« *the set of all organisms* »), celui de « tous les gènes » (« *the set of all genes* »), ou encore celui de « toutes les populations » (« *the set of all populations* »), si bien que les axiomes *B 1* et *B 2* peuvent être interprétés comme étant des énoncés qui définissent la relation de descendance par rapport, respectivement, à des lignées d'organismes, à des lignées de gènes ou à des lignées de populations (Williams 1970, p. 349). Il s'ensuit que l'axiomatisation de Williams (1970) permet d'établir des analogies formelles entre – au moins – ces trois niveaux, et donc de formaliser, par ce même biais, le présupposé d'après lequel il serait possible d'appliquer un seul et même modèle mathématique, qui décrit tel ou tel processus évolutif, à plusieurs échelles différentes, dont faisaient usage, comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, Dobzhansky (1951, 1970) et Simpson (1944).

En conséquence, c'est précisément dans le but de conserver le caractère général de son axiomatisation que Williams (1970) introduisait, par la suite, un terme dont la fonction consiste à désigner une unité d'organisation biologique plus abstraite que les organismes, les populations, les espèces, etc.. Il s'agit, notamment, du terme « clan » (« *clan* ») (Williams 1970, p. 350), qu'elle définissait de la manière suivante : « Pour tout ensemble d'entités biologiques *S* [dans le biocosme *B*], le clan *C* de l'ensemble *S* est l'ensemble de toutes les entités biologiques *b''* telles que *b''* est un élément de *S* ou *b''* est un *i*-descendant de *S* pour un entier positif donné *i* [*the set of all biological entities b'' such that b'' is in S or b'' is an i-descendant of S for some positive integer i*] » (Williams 1970, p. 351). Par l'expression « *i*-descendant de *S* », il faut donc comprendre une entité biologique qui constitue le dernier élément d'un ensemble ordonné (*b', ..., b''*), de cardinalité *i*, qui ne contient que des entités biologiques qui sont dans une relation de descendance (les unes avec les autres) et

⁴¹⁶ Comme l'observait Rosenberg (1985), « cette propension à se laisser interpréter de plusieurs manières [*potential for multiple interpretation*] est caractéristique des théories scientifiques. Par exemple, la mécanique newtonienne peut être considérée comme étant une théorie qui porte sur les interactions entre étoiles, planètes, boules de billard, ou molécules [*can be treated as a theory about the interactions of stars, planets, billiard balls, or molecules*]. Il est particulièrement crucial que la théorie de l'évolution puisse faire l'objet de plusieurs interprétations, si bien qu'il soit possible de l'évaluer en fonction de chacune d'entre elles [*be subject to multiple interpretations, under each of which it can be assessed*] » et d'escamoter, par ce même biais, les problèmes que soulève l'existence de « désaccords autour de son véritable objet » (« *disagreements surrounding its true subject matter* ») (Rosenberg 1985, p. 138).

dans lequel b' est, justement, un quelconque élément de S ⁴¹⁷. Autrement dit, il s'agit du sommet terminal (ou extrémité) d'une « chaîne orientée » (« *directed path* ») (Thulasiraman & Swamy 1992, p. 100)⁴¹⁸ – du graphe que forme le biocosme en question – qui est, justement, de longueur i et qui a pour sommet initial (ou origine) ce même élément de S . Ce terme est, en outre, étroitement lié à deux termes supplémentaires, à savoir le terme « i -ème génération du clan C de l'ensemble S » (« *ith generation of the clan C of the set S* »), qui est équivalent au symbole « $C(i)$ », et le terme « *subclan* » (« *subclan* ») (Williams 1970, p. 352). Le premier désigne, en effet, « l'ensemble de tous les i -descendants de $C(0)$ » (« *the set of all i-descendants of C(0)* ») (Williams 1970, p. 352), où le symbole « $C(0)$ » peut être interprété comme désignant « la génération 0 de C » (« *the zeroth generation of C* »), qui n'est rien d'autre que l'ensemble S lui-même (Williams 1970, p. 351). Quant au second, il désigne, en revanche, un sous-ensemble d'un clan donné C , en tant qu'ensemble de chaînes orientées de descendants, c'est-à-dire soit le clan C lui-même, soit le clan C « à une ou à plusieurs branches [généalogiques] près » (« *with one or several branches removed* ») (Williams 1970, p. 351). Ces deux termes sont d'autant plus importants qu'ils permettent de représenter, dans le formalisme de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), des collections d'entités biologiques qui s'étendent à la fois dans l'espace (en tant qu'ensembles d'individus) et dans le temps (en tant que chaînes d'ancêtres), si bien qu'elles sont susceptibles de former des généalogies de lignées divergentes (ou convergentes), sans qu'il soit nécessaire d'émettre aucune hypothèse particulière au sujet de leur nature et de leurs interactions⁴¹⁹. Autrement dit, ils permettent d'envisager un biocosme comme étant non seulement la représentation d'« un ensemble d'organismes et de leurs

⁴¹⁷ Formellement parlant, Williams (1970) définissait le terme « descendant » comme suit : b'' est un descendant de b' si et seulement si il existe une « descendance de b' à b'' » (« *a descent from b' to b''* »), dénotée par le symbole « $R(b', b'')$ », c'est-à-dire si et seulement si il existe « un ensemble ordonné d'entités biologiques [*'an ordered set of biological entities'*] $\{b_1, b_2, \dots, b_k, b_{k+1}\}$ qui soit tel que $b' = b_1, b'' = b_{k+1}, k \geq 1$ et que, pour tout $1 \leq i \leq k, b_i > b_{i+1}$ » (Williams 1970, p. 350). Il en découle, en outre, que, si b'' est un descendant de b' , alors b' est un « ancêtre » (« *ancestor* ») de b'' (Williams 1970, p. 351).

⁴¹⁸ Voir note à la page précédente.

⁴¹⁹ Comme l'observait Williams (1970) elle-même, « cette définition du terme 'clan' ne présuppose pas que tous les organismes qui appartiennent au clan ont un ancêtre commun [*'all of the organisms in the clan have a common ancestor'*] ; cela me permettra de parler du clan d'un ensemble d'organismes qui possèdent un trait particulier sans faire aucune hypothèse sur l'ascendance [*'ancestry'*] de l'ensemble en question. Remarquez que, dans une population qui se reproduit sexuellement [*'in a sexually reproducing population'*], le fait que l'entité b_1 appartienne à la deuxième génération de C garantit uniquement qu'au moins l'un de ses deux parents et qu'au moins l'un de ses quatre grands-parents appartiennent [à leur tour,] à C ; il se peut que C soit une population complètement endogame [*'a completely inbreeding population'*], mais souvent elle ne le sera pas » (Williams 1970, p. 352).

parents » (« *a set of organisms and their parents* »), mais également celle d'« un ensemble de clans et de *subclans* » (« *a set of clans and subclans* »), et donc de formaliser, par ce même biais, la « pensée populationnelle » dont parlait Ernst Mayr (1975, 2006). C'est précisément dans une telle perspective que Williams (1970) pouvait, ainsi, démontrer une série de « théorèmes sur les *subclans* » (« *theorems about subclans* ») (Williams 1970, p. 353) dont la fonction consiste à formuler des lois qui en décrivent, justement, l'évolution au fil des générations. Ces théorèmes introduisent, notamment, le concept de « fixation » d'un trait phénotypique dans une population ou dans un *taxon* donné, en tant que « fixation [d'un *subclan*] C_1 [dans un clan] C » (« *fixing C_1 in C* ») (Williams 1970, p. 354). Plus précisément, par « fixation d'un *subclan* dans un clan donné », Williams (1970) entendait le fait « clairement évident » (« *clearly evident* ») que, si un clan C contient, à la génération $C(j)$, un *subclan*, $C_1(j)$, d'entités biologiques qui possèdent un trait dont la valeur sélective est telle que, après n générations (c'est-à-dire à la génération $C(j + n)$), l'on constatera que $C(j + n) = C_1(j + n)$, alors il en découle que « chaque organisme des générations successives [à la génération $j + n$] de C sera un descendant du...sous-ensemble $C_1(j)$ » (« *every organism in subsequent generations of C will be a descendant of the... subset $C_1(j)$* ») (Williams 1970, p. 354). En conséquence, c'est précisément sur de tels résultats qui se fonde le volet proprement darwinien de l'axiomatisation de Williams (1970) et Rosenberg (1985), qui consiste à énoncer cinq axiomes supplémentaires, de portée plus spécifiques, permettant de définir, toujours de manière implicite, un biocosme de type particulier, c'est-à-dire un « biocosme darwinien » (« *Darwinian biocosm* »). Il s'agit, tout simplement, d'une structure mathématique dont les propriétés formelles sont telles qu'il est possible de la caractériser comme étant « un ensemble de *subclans* » (« *a set of subclans* ») dont l'évolution, au sens de « changement [d'état] au fil du temps » (« *change through time* »), « est dirigée par les lois de la sélection naturelle » (« *is directed by the laws of natural selection* ») (Williams 1970, p. 356), notamment telles qu'elles sont exprimées par les axiomes du volet proprement darwinien de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985). Mais qu'affirment donc ces autres axiomes ? En quoi pourraient-ils nous permettre de concevoir la théorie (synthétique) de l'évolution comme étant une théorie des forces évolutives dont le principe le plus abstrait serait, justement, le principe de sélection naturel en tant que schématisme hautement abstrait et à caractère nomologique ? Dans quelle mesure l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) se conformerait-elle aux canons de la conception classique des théories scientifiques ?

2.3.2 L'axiomatisation de Mary B. Williams et de Alexander Rosenberg : la sélection naturelle hors sol génétique ?

Afin de répondre à une telle question, il est utile, avant toute chose, de résumer l'argument informel que nous pouvons dégager de ces cinq axiomes. Ces derniers traduisent, en effet, le présupposé que l'évolution consisterait dans un double processus de « perpétuation différentielle » (« *differential perpetuation* ») (Williams 1970, p. 367) d'entités biologiques qui possèdent des caractéristiques qui les distinguent d'autres entités de la même sorte, ainsi que de « descendance avec modification [adaptative] » (« *descent with modification* ») de ces mêmes entités à partir d'ancêtres communs (Williams 1970, p. 367). Un tel processus ne serait, en outre, rien d'autre qu'une conséquence logique (et notamment une conséquence déductive) des conditions que stipulent les axiomes eux-mêmes. Premièrement, il existerait des ensembles d'entités naturelles qui seraient sujets à deux types de forces : d'une part, des « forces de cohésion » (« *cohesive forces* ») (Williams 1970, p. 356), pour ainsi dire, « internes » – telles qu'un système de reproduction endogamique ou la présence de conditions environnementales particulières, etc. –, qui pousseraient les entités qui appartiennent à tel ou tel ensemble à ne pas se séparer et qui serviraient également de mécanismes de contrôle visant à maintenir le nombre d'effectifs à un niveau constant ; d'autre part, des forces de pression sélective, pour ainsi dire, « externes », qui favoriseraient les caractéristiques de certains éléments dudit ensemble plutôt que celles des autres. Deuxièmement, l'équilibre entre ces deux types de forces ferait donc en sorte que ces ensembles d'entités biologiques soient sujets à une « force » (« *force* ») de sélection nette qui les « pousserait... dans une certaine direction [*pushing... in a certain direction*'] (par exemple, vers un allongement du cou, ou vers une proportion optimale de différentes formes organiques dans une population polymorphe) » (Williams 1970, p. 356). Troisièmement, la direction et l'intensité des différentes pressions de sélection qui s'exercent sur tel ou tel ensemble d'entités biologiques seraient déterminées par un certain nombre de facteurs dont l'influence peut être quantifiée au moyen du concept de « valeur sélective », ou « *fitness* ». D'après la définition « intuitive » (« *intuitive* ») qu'en donnait Williams (1970), un tel concept correspond, en effet, à une « mesure de la qualité de la relation qu'un certain organisme entretient avec son propre environnement » (« *a measure of the quality of the relationship between an organism and its environment* ») – c'est-à-dire avec « l'ensemble de tous les facteurs externes qui l'ont influencé tout au long de sa vie » (« *the set of all external factors which have influenced it during its life* ») – et qui est « déterminée par des facteurs tels que la fertilité, la capacité à obtenir de la nourriture, la capacité à éviter les dangers, etc. » (« *determined by such factors as fertility, ability to get food, ability to avoid dangers, etc.* ») (Williams 1970, p. 358). Quatrièmement, comme les diverses fractions dont se

compose un ensemble d'entités biologiques qui est sujet à des pressions de sélection présenteront des différences de valeur sélective qui entraîneront des différences dans leurs taux de survie et de reproduction respectifs, alors que le nombre des effectifs de ce même ensemble tendra à rester constant, il faudra s'attendre à ce que se produise un processus de « survie des plus aptes » (« *survival of the fittest* »), ou plutôt, comme l'appelait Williams (1970) elle-même, un processus d'« expansion des groupes d'entités qui sont (relativement) mieux aptes que les autres » (« *expansion of the fitter* ») (Williams 1970, p. 362). Autrement dit, toute fraction qui jouit d'un avantage sélectif – quoique marginal – par rapport aux autres verra augmenter le nombre de ses effectifs, jusqu'à ce qu'elle ne se fixe dans l'ensemble en question. Cinquièmement, comme la valeur sélective de telle ou telle entité biologique, par rapport à un environnement donné, est généralement corrélée à celle de ses parents, dans ce même environnement, l'on pourra s'attendre à ce que les différences de valeur sélective soient, elles-mêmes, héréditaires (« *hereditary fitness differences* ») (Williams 1970, p. 366), ce qui constitue, précisément, la condition de possibilité de l'expansion dont nous venons de parler. Nous pouvons donc en conclure non seulement que l'argument de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), tel que nous venons de le décrire de manière informel, recouvre les six énoncés fondamentaux de la théorie darwinienne que nous avons évoqués plus haut, mais également qu'il comporte deux volets distincts : d'une part, un volet statique, qui consiste à définir les contraintes, pour ainsi dire, « physiques » qui encadrent l'action de la sélection naturelle – et qui représentent autant de « *conditiones sine quibus non* » des processus évolutifs, à savoir l'existence d'ensembles d'entités biologiques dont la cohésion est assurée par l'action d'un certain nombre de forces de cohésion, dont le nombre d'effectifs reste généralement constant et dont les membres possèdent différentes valeurs sélectives ; d'autre part, un volet dynamique, qui consiste à décrire le fonctionnement de la sélection naturelle en tant que « force mécanique » – c'est-à-dire à décrire les « *conditiones per quas* » de ces mêmes processus –, à savoir l'« expansion des groupes d'entités qui sont (relativement) mieux aptes que les autres » et l'héritabilité des différences de valeur sélective⁴²⁰. Cela dit, de quelle manière ces

⁴²⁰ Nous retrouvons, par ailleurs, une distinction similaire chez Theodosius Dobzhansky (1951) : « L'évolution est un processus de changement ou de mouvement [*'Evolution is a process of change or movement'*]. Il est possible de diviser la description de tout mouvement en deux parties : la statique, qui traite des forces qui produisent tel ou tel mouvement et des conditions d'équilibre de ces mêmes forces [*'static, which treats of the forces producing a motion and the equilibrium of these forces'*], ainsi que la dynamique, qui traite du mouvement en tant que tel et de l'action des forces qui le produisent [*'dynamics, which deals with the motion itself and the action of forces producing it'*]. En suivant ce schéma, nous discuterons, en premier lieu, les facteurs qui entraînent des changements dans la composition génétique des populations (la statique évolutive) [*'the factors which bring about changes in the genetic composition of populations (evolutionary static)'*], et, en second lieu, les interactions entre ces mêmes forces, telles qu'elles se manifestent dans la

deux volets de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) seraient-ils reliés l'un à l'autre, d'un point de vue formel ? En quoi nous permettent-ils d'envisager le principe de sélection naturelle comme étant un schématisme à caractère nomologique et dynamique ? Dans quel mesure un tel système d'axiome se conformerait-il au modèle que représente la conception classique des théories scientifiques ?

L'interprétation de la structure déductive du système axiomatique esquissé par Williams (1970) et par Rosenberg (1985) que nous venons de donner implique que les trois premiers axiomes (D_1 , D_2 , D_3) en constituent le volet statique. Mais qu'affirment-ils, concrètement ?

Axiome $D1$: « Pour tout *subclan* darwinien [*'Darwinian subclan'*] D , D est un *subclan* d'un clan dans (B, \triangleright) » (Williams 1970, p. 357). Autrement dit, la fonction de cet axiome consiste, tout simplement, à introduire le terme primitif « *subclan* darwinien », dont on peut se servir pour désigner un ensemble cohésif d'entités biologiques qui est susceptible de faire l'objet d'un processus de sélection. Comme le remarquait Rosenberg (1985) lui-même, cet axiome n'affirme pas l'existence d'(au moins) un ensemble de cette nature, car cela relève d'une éventuelle « confirmation (empirique) de la théorie de la sélection naturelle elle-même » (« *confirmation of the theory of natural selection itself* ») (Rosenberg 1985, p. 140), mais il se limite à affirmer que, si un tel ensemble existait, il serait possible de le représenter au moyen d'un objet mathématique qui possède exactement les mêmes propriétés formelles que l'objet « *subclan* » dont nous avons parlé plus haut. En cela, « la notion de '*subclan* darwinien' ressemble à la notion de 'charge positive' de la théorie électromagnétique [*'the notion of 'positive charge' in electromagnetic theory'*] » (Rosenberg 1985, p. 140)⁴²¹.

Axiome $D2$: Si l'on définit le symbole « $v(C_1, k)$ » comme étant un symbole qui dénote « le nombre d'entités biologiques que contient la génération k du *subclan* C_1 » (« *the number of biological entities in generation k of the subclan C_1* ») (Williams 1970, p. 358), alors l'on peut affirmer que « pour tout

formation et la désintégration des races et des espèces [*'the interactions of these forces in race and species formation and disintegration (evolutionary dynamics)'*] » (Dobzhansky 1951, p. 17).

⁴²¹ « Cette théorie ne saurait rien nous dire au sujet de la charge positive en tant que telle [*'about positive charge itself'*]. Elle nous parle uniquement des conséquences de la présence d'une charge positive pour les phénomènes électriques et magnétiques [*'only about the consequences of positive charge for electrical and magnetic phenomena'*]. Si l'on exigeait de la théorie qu'elle explique ce qu'est la charge positive en tant que telle [*'what positive charge itself is'*], ou ce que possède une charge positive qu'une charge négative ne possède pas, l'on se tromperait lourdement au sujet de la signification et de la fonction de ces mêmes notions dans la théorie électromagnétique [*'one would be making a fundamental mistake about the meaning and function of these notions in electromagnetic theory'*] » (Rosenberg 1985, p. 140).

subclan darwinien D , il existe un entier positif [*'a positive integer'*] $\mu(D)$ qui est tel que $v(C_1, k) \leq \mu(D)$ pour toute génération k » (Williams 1970, p. 358). Il s'agit, par conséquent, d'un axiome qui permet de formaliser la contrainte malthusienne d'où découle la conclusion qu'il existerait une « lutte acharnée pour la survie » (« *severe struggle for life* ») et dont l'adoption se justifie sur la base du constat de l'existence, « dans le monde réel » (« *in the real world* »), d'une « limite absolue à la quantité de matière qui existe sur la planète terre » (« *absolute limitation on the quantity of matter on earth* ») (Williams 1970, p. 358).

Axiome $D3$: « Pour toute entité biologique b qui appartient à B , il existe un nombre réel positif [*'positive real number'*] $\varphi(b)$ » (Williams 1970, p. 359). Cet axiome affirme, par conséquent, qu'il est possible d'attribuer à toute entité biologique un nombre réel positif qui en dénote la valeur sélective, ou *fitness*, relativement à l'environnement dans lequel elle vit. Le terme « valeur sélective » constitue, ainsi, un terme primitif du système axiomatique de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), dont il est possible de donner une « définition opérationnelle » (« *operational definition* ») (Williams 1970, p. 359), c'est-à-dire une définition informelle qui permette de faciliter les opérations de calcul et de déduction qui impliquent ce même terme et le nombre qui y est associé⁴²², mais dont

⁴²² « Comme définition opérationnelle possible de [la *fitness* intrinsèque (c'est-à-dire absolue) de b] [*'intrinsic fitness of b'*], $\varphi(b)$, je pourrais suggérer la suivante. Soit $v_1(b, k)$ la somme par rapport à tous les k -ancêtres de b du nombre de rejetons de chacun qui se reproduisent [*'the sum over all k-ancestors of b of the number of reproducing offspring of each'*]. Puis, soit $v_2(b, k)$ le nombre des k -ancêtres de b . Alors $v_3(b, k) = v_1(b, k)/v_2(b, k)$ est un estimé de la '*fitness moyenne*' des k -ancêtres de b [*'the 'average fitness' of the k-ancestors of b'*]. Que la définition opérationnelle de $\varphi(b)$ soit :

$$\varphi_0(b) = \sum_{k=1}^n (0,5)^k v_3(b, k)$$

où k représente le nombre de générations pour lesquelles les données sont disponibles [*'the number of generations for which data are available'*]. Dans ces conditions environ 0,5 de la *fitness* de b est estimé selon la '*fitness moyenne*' de ses grands-parents ; etc. ». Il en découle que « $(0,5)^k$ est un facteur qui ajuste l'importance à accorder à des générations plus éloignées [*'a factor which adjusts the importance to be attached to more remote generations'*] » et qui « convient le mieux aux populations sexuelles dans des environnements à changement lent [*'most appropriate for sexual populations in slowly changing environments'*] » (Williams 1970 ; Duchesneau 1997, p. 334-335). Quant à la *fitness* relative d'une entité b par rapport à la k -ième génération du *subclan* darwinien D , dénotée par le symbole « $\varphi(b, D, k)$ », Williams (1970) en donnait la définition opérationnelle suivante :

on ne saurait donner aucune » définition explicite et exhaustive. C’est ainsi que, afin de justifier le choix de considérer le terme qui désigne un concept aussi fondamental pour la biologie de l’évolution comme étant primitif, les auteurs présentaient deux arguments majeurs, l’un de nature logique et l’autre de nature ontologique. D’un point de vue logique, Williams (1973b) avançait que la meilleure manière de définir un terme scientifique hautement abstrait – tel que, justement, le terme « valeur sélective » – consisterait, dans un premier temps, à l’introduire dans le cadre d’une théorie qui ait été reconstruite sous la forme d’un système axiomatique, en tant que terme primitif, et, successivement, à en identifier un certain nombre de possibles interprétations empiriques qui permettent de mettre à l’épreuve la théorie tout entière. Elle considérerait, en effet, que,

après que la théorie a été axiomatisée, les différentes interprétations réussies du terme primitif [*‘the various successful interpretations of the primitive term’*] [(c’est-à-dire les interprétations qui permettent de vérifier empiriquement la théorie en question)] nous fournissent la définition la plus exhaustive possible de sa signification dans le monde réel [*‘the most comprehensive possible statement about its meaning in the real world’*] (Williams 1973b, p. 93).

D’un point de vue ontologique, Rosenberg (1985) remarquait que la valeur sélective, ou *fitness*, des entités biologiques peut être considérée – en tant que « caractéristique objective et bien identifiable [*‘definite, objective feature’*] [des entités en question] qui est engendrée, de manière causale, [*‘causally generated’*] par d’autres caractéristiques objectives [de ces mêmes entités] et de leurs environnements [*‘by other objective features of them and their environments’*] » (Rosenberg 1985, p. 165) – comme étant une propriété qui « survient » (« *supervenies* ») « sur un certain ensemble de propriétés manifestes des organismes... et sur des propriétés de leur environnement » (« *a given set of manifest properties of organisms... and on properties of their environment* ») (Rosenberg 1985, p. 164). En conséquence, s’il est vrai que deux organismes qui possèdent les mêmes propriétés manifestes – c’est-à-dire les mêmes « propriétés anatomiques, physiologiques et comportementales » (« *anatomical, physiological, and behavioral properties* ») (Rosenberg 1985, p. 164) – doivent nécessairement posséder le même « niveau de valeur sélective » (« *level of fitness* »), il serait,

$$\Phi(b, D, k) = \begin{cases} \frac{\varphi(b)}{\left(\frac{1}{v(D, k)}\right) (\sum_{b_i \in D(k)} \varphi(b_i))}, & \text{si } b \text{ appartient à } D(k) \\ 0, & \text{autrement} \end{cases}$$

(Williams 1970, p. 360).

néanmoins, impossible de définir le concept même de valeur sélective en le reliant à « un nombre raisonnablement limité de propriétés... fondamentales » (« *a manageably small number of basic... properties* ») (Rosenberg 1985, p. 165), qu'il s'agisse de propriétés évolutives ou non-évolutives, d'où l'intérêt de considérer le terme « valeur adaptative », ou « *fitness* », comme étant un terme primitif. Nous pouvons donc en conclure que, d'après Williams (1970) et Rosenberg (1985), la nature abstraite de ce même terme et le caractère complexe de la propriété survenante qu'il dénote en feraient un véritable « terme théorique » (« *theoretical term* ») (Rosenberg 1985, p. 141) au sens de Carnap (1956a, 1958) – tout comme les termes « électron » et « champ magnétique » –, d'autant plus qu'il s'agirait également « d'un prédicat quantitatif dont la valeur numérique ne peut pas être déterminée en faisant abstraction de la théorie dans laquelle il figure » (« *a quantitative predicate whose numerical value cannot be determined independently of the theory in which it figures* ») (Rosenberg 1985, p. 141).

Il en découle que ces trois axiomes décrivent les conditions qui rendent possible l'émergence de processus évolutifs qui soient dirigés par la sélection naturelle, si bien que nous pouvons en conclure qu'ils constituent effectivement les principes fondamentaux d'une statique de l'évolution telle que nous l'avons définie plus haut. Cela dit, qu'en est-il donc des deux axiomes restants (*D4*, *D5*) ?

Axiome *D4* : Afin de formuler le quatrième axiome, Williams (1970) se servait d'un nouveau terme, c'est-à-dire le terme « *subcland* » (« *subcland* ») (Williams 1970, p. 360). Il s'agit, plus précisément, d'un terme qui dénote « un *subclan* qui est contenu dans un *subclan* darwinien » (« *a subclan which is contained within a Darwinian subclan* ») (Williams 1970, p. 360) et qui permet donc d'écrire l'énoncé suivant : « Pour tout couple de générations j_1 et j_2 , telles que $j_1 < j_2$, s'il existe un *subcland* D_1 dérivé de $D_1(j_1) \subset D(j_1)$ ⁴²³ qui soit tel que

$$\sum_{k=j_1}^{j_2} v(D_1, k) [\Phi(D_1, D, k) - 1] \geq 1$$
⁴²⁴

⁴²³ « Le *subclan* dérivé du *subclan* $C_1(j)$ [, c'est-à-dire C_1 ,] est la somme de l'ensemble de tous les descendants de $C_1(j)$ et de l'ensemble de tous les ancêtres de $C_1(j)$ » (« *the subclan derived from $C_1(j)$ is the set of all descendants of $C_1(j)$ plus the set of all ancestors of $C_1(j)$* »), si bien que, en termes plus formels, $C_1 = \bigcup_k^\infty C_1(k)$ (Williams 1970, p. 354).

⁴²⁴ $\Phi(D_1, D, k)$ n'est rien d'autre que la valeur sélective moyenne des entités qui appartiennent au *subcland* D_1 relativement à la k -ième génération du *subclan* darwinien D . Voir Williams (1970, p. 360).

alors il existe une génération j_* , $j_1 < j_* \leq j_2$, telle que si D_2 est le *subcland* dérivé de $D(j_1) - D_1(j_1)$ ⁴²⁵, alors $v(D_2, j_*) = 0$ ou

$$\frac{v(D_1, j_*)}{v(D_2, j_*)} > \frac{v(D_1, j_1)}{v(D_2, j_1)}$$

» (Williams 1970, p. 363). Afin d'expliciter la signification biologique de cet axiome, nous pouvons le reformuler comme suit. Considérons un *subclan* darwinien D qui contient, à la j_1 -ème génération, un certain *subcland*, D_1 . Supposons que ce *subcland* possède, en raison de son ascendance, une valeur sélective qui est supérieure à la valeur sélective moyenne du *subclan* qui le contient et qu'il soit susceptible de transmettre un tel avantage à sa descendance (d'où l'utilité du concept de *subcland* dérivé). Comme, par la définition même de valeur sélective (moyenne) relative, si la valeur sélective moyenne des membres de D_1 était égale à celle des membres de D , on aurait $\Phi(D_1, D, j_1) = 1$ (Williams 1970, p. 363), nous pouvons mesurer l'avantage supérieur des membres du premier, relativement aux autres membres du second, par la quantité $\Phi(D_1, D, j_1) - 1 > 0$. Par conséquent, si nous supposons également que, au cours des générations k qui s'écouleront entre la j_1 -ème et la j_2 -ème, les membres de D_1 accumuleront des avantages sélectifs, tandis que leur nombre restera suffisamment large pour que cette accumulation ne soit contrecarrée par aucun événement aléatoire – c'est-à-dire si nous supposons que $\sum_{k=j_1}^{j_2} v(D_1, k) [\Phi(D_1, D, k) - 1] \geq 1$ –, alors nous pouvons en conclure que, à une certaine génération $j_1 < j_* \leq j_2$, la valeur du rapport entre le nombre des entités du *subclan* D qui appartiennent à la lignée généalogique du *subcland* D_1 (en prenant en considération aussi bien les ancêtres que les descendants futurs) et celui des entités du premier qui n'appartiennent pas à la lignée du second sera supérieure à la valeur qu'il avait à la j_1 -ième génération. Cela signifie que, entre la j_1 -ième et la j_* -ième génération, le poids du *subcland* D_1 au sein du *subclan* darwinien D a augmenté au détriment du poids de tous les autres *subclands*. Il s'ensuit que, si les membres de D_1 continueront à transmettre leur avantage sélectif aux générations suivantes, leur nombre continuera à augmenter, jusqu'à ce que D_1 ne se fixe en D , c'est-à-dire jusqu'à ce que tous les membres de D ne soient également membres de D_1 , ce que nous pouvons exprimer de la manière suivante : $\lim_{k \rightarrow \infty} D_1(k) = D(k)$. Comme le précisait Rosenberg (1985) lui-même, cet axiome est particulièrement important, car il constitue le cœur, pour ainsi dire, « dynamique » de l'axiomatisation de la théorie de Darwin (1859) que nous sommes en train d'analyser. Plus précisément, il constitue une sorte d'analogue du théorème fondamental de Fisher (1930), et donc, du

⁴²⁵ $D(j_1) - D_1(j_1)$ dénote l'ensemble de tous les entités qui appartiennent à la j_1 -ième génération du *subclan* darwinien D qui n'appartiennent pas à la j_1 -ième génération du *subcland* D_1 .

moins en principe, une sorte d'analogie de « la seconde loi de la thermodynamique » (« *second law of thermodynamics* ») (Rosenberg 1985, p. 143)⁴²⁶. Nous pouvons donc en conclure qu'un tel axiome représente, dans le cadre de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), une traduction du principe de sélection naturelle sous la forme d'une loi-conséquence de la sélection en tant que force évolutive.

Axiome *D5* : Le dernier axiome qu'ont proposé Williams (1970) et Rosenberg (1985) sert à exprimer le principe d'après lequel, afin qu'un processus de sélection puisse aboutir à un véritable changement évolutif, il est nécessaire que, indépendamment de tout « mode de transmission héréditaire » (« *mode of inheritance* ») particulier, « des différences de valeur sélective sont transmises d'une génération à la suivante au cours d'un nombre de génération qui est suffisamment grand pour qu'un *subclan* puisse se fixer » (« *some fitness differences are passed on from generation to generation for enough generations to ensure the fixation of one of the subclands* ») (Williams 1970, p. 366). Afin de formaliser un tel principe, l'on peut donc affirmer ce qui suit : « Il existe un nombre positif τ qui est tel que, pour une génération m quelconque d'un *subclan* darwinien D quelconque, si

$$\sum_{k \geq m} \sum_{b \in D(k)} \varphi(b) \geq \tau$$

Alors il existe un *subclan* D_* , dérivé de $D_*(m) \subset D(m)$, et un ensemble infini de nombres entiers $\{l_1, l_2, l_3, \dots\}$ qui sont tels que $m - 1 = l_1 < l_2 < l_3 < \dots$, $D_*(l_2) \neq D(l_2)$,

$$\sum_{k=l_i+1}^{l_{i+1}} v(D_*, k) [\Phi(D_*, D, k) - 1] \geq 1$$

lorsque $D_*(l_{i+1}) \neq D(l_{i+1})$ et

⁴²⁶ Plus précisément, Rosenberg (1985) allait jusqu'à affirmer que l'axiome *D4* représenterait le fondement même du théorème de Fisher (1930), dans la mesure où, pourvu qu'on l'interprète comme étant un théorème qui affirme que « la *fitness* [moyenne] d'une population qui forme un *subclan* augmente à un taux qui est proportionnel à la variabilité héréditable de la *fitness* [moyenne] de ses propres *subclands* » (« *the fitness of a subclan population increases at a rate proportional to inheritable variability in the fitness of its subclands* ») (Rosenberg 1985, p. 143), il serait possible de déduire celui-ci à partir de celui-là. En effet, « si la fraction du *subclan* ayant la plus haute valeur sélective doit augmenter, plus grandes seront les différences de valeur sélective entre ce dernier et le reste du *subclan*, alors plus rapide sera le taux d'augmentation de la *fitness* du *subclan* tout entier » (« *if the proportion of the fittest subclan must increase, the greatest the differences between the fittest subclan and the rest of the subclan, then the faster will be the rate of increase of the whole subclan's fitness* ») (Rosenberg 1985, p. 143).

$$\sum_{k=l_{i+1}}^{l_{i+1}} v(D_*, k) [\Phi(D_*, D, k) - 1] \geq 0$$

lorsque $D_*(l_{i+1}) = D(l_{i+1})$ (Williams 1970, p. 367). Autrement dit, l'on peut affirmer que, pour toute génération m donnée, il doit exister une sorte de valeur limite, τ , de la réserve future de valeurs sélectives dont dispose un certain *subclan* darwinien D – c'est-à-dire de la somme des valeurs sélectives de toutes les entités qui appartiendront aux générations successives de ce même *subclan*, $\sum_{k \geq m} \sum_{b \in D(k)} \varphi(b)$. Cette valeur doit, en outre, être telle que, aussi longtemps qu'elle ne sera pas atteinte, il existera toujours, au sein de D , un *subclan* D_* qui aura un avantage sélectif par rapport aux autres et qui continuera, par conséquent, à croître jusqu'à ce qu'il ne parvienne à se fixer – puisque $\sum_{k=l_{i+1}}^{l_{i+1}} v(D_*, k) [\Phi(D_*, D, k) - 1] \geq 1$, lorsque $D_*(l_{i+1}) \neq D(l_{i+1})$ –, pourvu que le *subclan* D ne se trouve pas « au bord de l'extinction » (« *on the verge of extinction* ») (Williams 1970, p. 366), c'est-à-dire pourvu qu'il possède toujours un niveau de valeur sélective qui lui permette de continuer, lui aussi, à croître même après que le *subclan* D_* se sera fixé – ce qui s'exprime, justement, par la condition formelle $\sum_{k=l_{i+1}}^{l_{i+1}} v(D_*, k) [\Phi(D_*, D, k) - 1] \geq 0$, lorsque $D_*(l_{i+1}) = D(l_{i+1})$. Il en découle que l'importance de cet axiome est double. D'une part, il permet d'affirmer que, au sein de n'importe quel *subclan* darwinien qui ne soit pas proche de l'extinction, il existe toujours des différences de valeurs sélectives qui sont héréditaires et qui sont suffisantes à alimenter la sélection naturelle, en tant que processus qui amène à la fixation des *subclands* dont la valeur sélective moyenne est la plus élevée. Pour une telle raison, nous pouvons en conclure que, si l'axiome $D4$ représente une loi-conséquence de la sélection naturelle, l'axiome $D5$ peut être interprété comme étant à la fois une loi-conséquence et une loi-source, dans la mesure où il décrit la manière dont la sélection naturelle agit sur ces mêmes différences (héréditaires) de valeurs sélectives qui en constituent, justement, l'une des causes. D'autre part, comme le précisait Rosenberg (1985) lui-même, cet axiome se veut également comme l'expression de la « neutralité [du principe de sélection naturelle] relativement aux mécanismes héréditaires » (« *neutrality with respect to hereditary mechanisms* ») (Rosenberg 1985, p. 144). Il se limite, en effet, à présupposer l'existence de différences de valeurs sélectives qui se transmettent d'une génération à l'autre, jusqu'à ce que la réserve de *fitness* du *subclan* en question n'atteigne une certaine valeur limite, et dont la transmission se reconnaît uniquement à ses effets – c'est-à-dire à l'accroissement du nombre d'effectifs de tout *subclan* qui possède un avantage sélectif relativement aux autres –, et non pas à ses causes⁴²⁷. En cela, il occupe

⁴²⁷ « Par ailleurs, l'axiome [$D5$] serait satisfait [*'would obtain'*] même au cas où les différences de *fitness* persisteraient, de génération en génération, sous l'effet d'un coup de chance durable [*'as a result of a long-term fluke'*], sans qu'il

une place importante au sein de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), puisque, comme nous l'avons anticipé plus haut, la critique majeure que ce dernier adressait à la formalisation de Ruse (1973) consistait justement à faire valoir la nécessité de reconstruire la théorie de l'évolution indépendamment de toute hypothèse sous-jacente qui porterait sur la nature des mécanismes héréditaires.

Nous pouvons donc en conclure que les axiomes *D4* et *D5* peut être interprétés comme étant des lois-conséquences de la sélection naturelle, en tant que force évolutive. En cela, ils forment les principes fondamentaux d'une possible théorie dynamique de l'évolution qui régirait l'histoire de la vie, et ils sont reliés aux axiomes précédents – qui structurent le volet de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) que nous avons qualifié de « statique » – dans la mesure où ils présupposent la structure ensembliste que permettent de définir ces derniers, ainsi que le concept même de valeur sélective, ou *fitness*, qui est introduit par l'axiome *D3*. Cela dit, si nous pouvons en conclure que l'axiomatisation que proposaient Williams (1970) et Rosenberg (1985) permet de concevoir la théorie de l'évolution, et notamment la théorie darwinienne de l'évolution par sélection naturelle, comme étant une théorie des forces évolutives, en quoi s'accorderait-elle avec les canons de la conception classique des théories scientifiques ?

Comme première chose, nous pouvons remarquer que l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) relève, sans nul doute, d'une approche syntaxique de la structure et du contenu (Mormann 2007 ; Vorms 2009, 2011 ; Winther 2015) de la théorie de l'évolution. Il s'agit, notamment, d'une conception de la théorie de l'évolution comme objet logico-linguistique, c'est-à-dire comme système axiomatique de termes et d'énoncés qui possèdent deux propriétés fondamentales : d'une part, ils sont des énoncés qui ne sont pas formulés dans le langage de la logique prédicative du premier ordre, ni dans celui de la théorie des types (simples ou ramifiés), mais, comme nous l'avons vu plus haut, dans celui de la théorie des ensembles (strictement) partiellement ordonnés et de la théorie des graphes ; d'autre part, ils sont dépourvus, en tant que tels, de toute signification cognitive, en ceci qu'ils ne portent pas sur des objets déterminés – ni même sur des objets de nature purement logique –, si bien qu'il est possible de leur attribuer une multiplicité d'interprétations, et notamment une multiplicité d'interprétations biologiques. C'est précisément ce que mettaient en avant Williams (1970) et Rosenberg (1985) eux-mêmes lorsqu'ils insistaient sur le fait que leur

n'existe aucun fondement physique [*any physical foundation whatever*] pour leur transmission. Cet axiome n'exige même pas que les différences de *fitness* soient complètement héréditaires ; une concordance partielle de valeurs de *fitness* entre des générations successives de descendants suffira à engendrer un processus évolutif [*partial concomitance of fitness values between successive descendants will suffice to generate evolution*] » (Rosenberg 1985, p. 144).

axiomatisation de la théorie de Darwin (1859) est susceptible s'appliquer, à la fois, à l'évolution de lignées de gènes, à l'évolution de lignées d'organismes et à celle de lignées d'espèces, voire de lignées de *taxa* supérieurs. Néanmoins, contrairement aux préconisations du modèle qu'incarne la conception classique des théories scientifiques, l'axiomatisation de la théorie de l'évolution, et notamment du principe de sélection naturelle, qu'ont proposée Williams (1970) et Rosenberg (1985) ne comporte aucun postulat de coordination. Autrement dit, alors que, d'après la conception classique des théories scientifiques, une théorie se formalise sous la forme d'une conjonction de postulats théoriques et de postulats de coordination, **TC**, l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) se réduit à un ensemble de postulats **T**, d'où sont dérivés des théorèmes dont la fonction est de rendre compte de telle ou telle classe de phénomènes particuliers, d'après le modèle nomologico-déductif de l'explication. Les implications d'une telle observation ne se limitent, cependant, pas à la question de savoir si l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) se conforme au modèle de la conception classique des théories scientifiques, dans la mesure où elles s'étendent également à la question à laquelle nous venons d'apporter une réponse, c'est-à-dire la question de savoir dans quelle mesure cette reconstruction formelle de la théorie de l'évolution nous permet de concevoir cette dernière comme étant une théorie des forces évolutives. En effet, l'une des conséquences que nous pouvons tirer consiste à affirmer que, tout en étant compatible avec une interprétation génétique, l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) n'est pas, de manière intrinsèque, génétiquement fondée. En cela, bien qu'elle permette de concevoir le principe de sélection naturelle comme étant un schématisme nomologique de nature dynamique, elle ne constitue pas une reconstruction exhaustive de la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie. L'on pourrait certes retorqueur qu'une telle objection manquerait de pertinence, puisque le but déclaré de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) était, justement, d'axiomatiser la théorie de l'évolution par sélection naturelle non pas dans sa version « synthétique », mais telle qu'elle avait été conçue par Darwin (1859) lui-même⁴²⁸. Cependant, comme nous pouvons le déduire des critiques que Sober (1984b) a lui-même adressées à Williams et Rosenberg (1985), si l'on

⁴²⁸ Cela dit, Williams et Rosenberg (1985) précisaient eux-mêmes que « Notre omission de la génétique mendélienne, ainsi que d'autres composantes accessoires de la théorie de l'évolution, n'a été le résultat ni d'un oubli, ni... du désir de restituer 'le Darwin historique' [*'was the result neither of oversight nor... of an interest in 'representing the historical Darwin'*]. La raison de son omission est qu'aucune théorie générale ne peut contenir des éléments mutuellement incohérents qui décrivent tous les divers mécanismes héréditaires, et qu'aucune théorie de l'évolution qui soit digne de ce nom ne peut être rattachée à la seule génétique mendélienne [*'no general theory can contain mutually inconsistent components describing all the various mechanisms of heredity, and no warrantable evolutionary theory can be committed to Mendelian genetics alone'*] [, à l'exclusion de toute autre théorie de l'hérédité] » (Williams & Rosenberg 1985, p. 741).

reconstruit le principe de Darwin (1859) sous un jour purement démographique et généalogique⁴²⁹, c'est-à-dire sous la forme d'une loi qui se limite à décrire la dynamique d'expansion ou de rétrécissement de telle ou telle lignée ou de telle ou telle population, l'on risque de faire l'impasse de ce que Sober (1984a) appelait, comme nous l'avons vu plus haut, « l'hypothèse historique » de Darwin (1859), qui fait partie intégrante de son hypothèse, plus générale, de la sélection naturelle. Cette hypothèse historique consiste tout simplement à affirmer que, au cours de l'histoire de la planète terre, se sont réalisées un certain nombre de conditions, historiquement déterminées, qui ont fait en sorte qu'ait lieu un processus d'évolution guidé par la sélection naturelle. Pour cette raison, on peut la considérer comme étant une conséquence logique d'un autre énoncé, c'est-à-dire l'énoncé qui affirme que « la variation héritable de la valeur de sélection entraîne l'évolution [par sélection naturelle], si aucune autre force évolutive n'intervient » (« *heritable variation in fitness implies evolution, if no other evolutionary forces impinge* ») (Sober 1984b, p. 373). Autrement dit, afin de comprendre le caractère historique de la théorie de Darwin (1859) en tant que théorie de la sélection naturelle, il est nécessaire de prendre en considération les principes et les modèles qui permettent d'identifier et de quantifier les effets des différentes forces évolutives, car l'absence de ces mêmes effets représente, précisément, l'une des conditions historiquement déterminées qui sont nécessaires afin qu'aient lieu des processus d'évolution par sélection naturelle. Nous savons aujourd'hui que de tels principes et de tels modèles ne sont pas autre chose que les modèles et les principes de la génétique des populations⁴³⁰. D'ailleurs, comme l'a également remarqué Thompson (1989), l'une des

⁴²⁹ Comme le remarque Thierry Hoquet (2009), la théorie de Darwin (1859) ne saurait se réduire à une théorie généalogique (« *Abstammungslehre* ») de l'origine des espèces, en ceci que la « descendance » dont parlait ce dernier « s'entend [à la fois] vers l'amont (l'ancêtre) et vers l'aval (la progéniture qui en suit) ». Ce qui fait l'originalité d'une telle théorie consiste donc en ceci qu'elle lie la descendance, comme processus de dérivation d'une progéniture à partir d'un ancêtre donné, à une conception particulière de la « variation qui surgit lors de la génération » de cette même progéniture. En cela, elle constitue non seulement une théorie généalogique des espèces, mais également une « théorie des types de génération » de ces dernières, et notamment une théorie de la génération par sélection (« *Züchtungslehre* ») (Hoquet 2009, p. 18).

⁴³⁰ Il faut, néanmoins, rappeler que, dans leur réponse commune à Sober (1984b), Williams et Rosenberg (1985) offrent un contre-argument qui repose sur la distinction entre les « lois » (« *laws* ») générales que l'on peut déduire de telle ou telle théorie scientifiques et les « conditions initiales » (« *initial conditions* ») (Williams & Rosenberg 1985, p. 742) qui permettent d'appliquer les premières à tel ou tel phénomène particulier. Bien que ces conditions initiales constituent un point d'appui essentiel, elle ne relèvent pas de la théorie proprement dite, car ce n'est pas le rôle d'une théorie que de préciser les conditions spécifiques de son application dans tous les cas possibles et imaginables. Par exemple, « l'application de la mécanique newtonienne au mouvement terrestre nécessite une spécification de la constante gravitationnelle au voisinage de la terre [*a specification of the gravitational constant in the vicinity of the earth*]', c'est-à-dire $g = 32 \text{ ft/sec}^2$. Cette spécification ne fait pas partie de la mécanique newtonienne, qui se limite à affirmer qu'il

raisons que Rosenberg (1985) présentait à l'appui de l'idée que, tout en étant étroitement liée à la théorie de l'évolution par sélection naturelle, la génétique, et notamment la génétique, des populations n'en constituerait pourtant pas une composante essentielle consistait précisément à affirmer que cette dernière serait, pour ainsi dire, une « anti-théorie » du changement évolutif, en ceci que ses véritables objets seraient les mécanismes qui sont responsables de l'homogénéité et de l'équilibre des facteurs génétiques⁴³¹. Nous pouvons donc en conclure qu'on ne saurait séparer arbitrairement la théorie de l'évolution par sélection naturelle de la génétique mendélienne et des populations, non seulement en ce qui concerne, de manière spécifique, la théorie synthétique, mais également en ce qui concerne la théorie originaire de Darwin (1859). Mais est-ce que le choix de mettre entre parenthèse les fondements génétiques de l'évolution, qu'ont opéré Williams (1970) et Rosenberg (1985), est-il le fruit d'une simple hypothèse contingente ou serait-il plutôt lié, de manière plus structurelle, à leur propre démarche axiomatique ?

En ce qui concerne Rosenberg (1985), nous pouvons relier son intérêt pour l'axiomatisation de la théorie de l'évolution à ses vues « naturalistes » (« *naturalism* ») « réductionnistes » (« *reductionism* ») au sujet de la nature du savoir scientifique. La question du réductionnisme a, en effet, été posée à nouveaux frais à partir des années 1960, avec l'essor de la génétique moléculaire. La discussion s'est ainsi concentrée sur la possibilité de réduire la génétique mendélienne à la génétique moléculaire, d'après le modèle de réduction inter-théorique développé par Ernest Nagel (1961). En suivant les objections qu'avait soulevées David Hull (1972, 1973, 1974)⁴³², la plupart des

existe une constante gravitationnelle pour les corps doués de masse [*This specification is no part of Newtonian mechanics, which asserts only that there is a gravitational constant for bodies with mass*] » (Williams & Rosenberg 1985, p. 741). « De même », en concluaient-ils, « la théorie de l'évolution affirme qu'il y a au moins un mécanisme héréditaire qui rend possible l'évolution, mais elle ne précise pas de quel mécanisme il s'agit » (« *Similarly, evolutionary theory asserts there is at least one mechanism of heredity where evolution obtains, but does not specify it* ») (Williams & Rosenberg 1985, p. 741-742).

⁴³¹ « Rosenberg affirme également que la génétique des populations ne peut pas former le noyau de la théorie de l'évolution parce que des lois telles que la loi de Mendel et la loi de Hardy-Weinberg ne décrivent pas des situations de changement, mais des situations d'équilibre [*do not describe situations of change but situations of equilibrium*']. En plus des lois de la génétique mendélienne, l'évolution rend nécessaires des lois qui perturbent l'équilibre qui est décrit par la génétique mendélienne [*requires laws that disrupt the equilibrium described by Mendelian genetics*']. Les mécanismes du changement évolutif sont, en effet, les mécanismes qui perturbent l'équilibre génétique [*mechanisms of evolutionary change are those that disrupt the equilibrium*']. C'est pourquoi la théorie de l'évolution, bien comprise, décrit des mécanismes qui perturbent cet équilibre [*evolutionary theory, properly understood, describes mechanisms that disrupt this equilibrium*'] » (Thompson 1989, p. 65).

⁴³² Plus précisément, comme l'a expliqué Schaffner (1974), « Le point essentiel de la position de Hull est d'affirmer que les liens entre la génétique classique et la génétique moléculaire sont 'plusieurs-à-plusieurs', c'est-à-dire que pour un

philosophes de la biologie ont récusé l'idée que le concept de réduction serait à même de rendre compte des liens qui existent entre la biologie classique et la biologie moléculaire (voir Sarkar 1998, p. 151). D'autres, au contraire, ont défendu la validité du réductionnisme néo-positiviste, comme, par exemple, Michael Ruse (1974). D'ailleurs, c'est précisément en répondant aux critiques de Hull (1972, 1973, 1974), que ce dernier a dressé un parallèle entre le réductionnisme moléculaire en génétique et l'axiomatisation de la théorie de l'évolution : bien que la réalisation de ces deux démarches se heurte à des difficultés considérables, leur utilité réside dans le fait qu'elles permettent tout de même d'éclairer des questions théoriques fondamentales. En particulier, après avoir observé que « certains pans de la science de l'évolution, notamment ceux qui traitent de la diffusion des gènes dans les populations, se rapprochent d'une théorie hypothético-déductive » (« *certain parts of evolutionary science, particularly those concerned with the spread of genes in populations, do approximate to a hypothetico-deductive theory* ») (Ruse 1974, p. 644), Ruse (1974) en concluait que la démarche axiomatique serait susceptible de s'avérer fructueuse non seulement pour mieux comprendre ces pans de la théorie, mais également pour éclairer les relations qu'ils entretiennent avec d'autres branches de la biologie évolutive, moins formalisées. Il semble donc évident que nous pouvons inscrire l'axiomatisation proposée par Ruse (1973) dans une démarche réductionniste plus générale, visant à réduire la biologie de l'évolution à la génétique évolutive et cette dernière à la génétique moléculaire. Néanmoins, nous pouvons également affirmer la même chose au sujet de l'axiomatisation de Rosenberg (1985, 2006, 2007), quoique ce dernier ait fini par accepter les deux objections principales que Hull (1972, 1973, 1974) avait adressées au modèle néo-positiviste de réduction inter-théorique : d'une part, l'impossibilité d'identifier des relations de correspondance biunivoque entre les unités fondamentales de la génétique mendélienne et celles de la génétique moléculaire, c'est-à-dire entre les gènes et les séquences d'ADN ; d'autre part, l'absence de lois non seulement dans la biologie classique (à l'exception de celles incarnées par le principe de sélection naturelle), mais également dans la biologie moléculaire, ce qui rend impossible l'application du modèle nomologico-déductif de Nagel (1961) (Rosenberg 2007, pp. 121-122). En conséquence, c'est précisément dans le but de franchir ces deux obstacles que Rosenberg (2006) a proposé de reformuler la question du réductionnisme physicaliste, compris comme étant la thèse selon laquelle

terme mendélien donné (disons le prédicat 'dominant') il y aura plusieurs mécanismes moléculaires correspondants, qui auront pour résultat la dominance » (« *The essence of Hull's view is that connections between classical genetics and molecular genetics are many-many, i.e., that to one Mendelian term (say the predicate 'dominant') there will correspond many diverse molecular mechanisms which result in dominance* ») (Schaffner 1974, p. 619).

il existe une explication complète et détaillée de tout fait, état, événement, processus, tendance ou généralisation biologique, et qu'une telle explication ne mentionnera que l'interaction de macromolécules » (« *there is a full and complete explanation of every biological fact, state, event, process, trend, or generalization, and that this explanation will cite only the interaction of macromolecules to provide this explanation* ») (Rosenberg 2006, p. 12).

C'est précisément dans un tel but qu'il a défini un programme de « réductionnisme darwinien » (« *Darwinian reductionism* ») (Rosenberg 2006) qui consiste en deux étapes : la subordination des explications fondées sur les causes ultimes des fonctions biologiques à celles fondées sur leurs causes proximales, c'est-à-dire sur les mécanismes physico-chimiques étudiés par la biologie moléculaire, ainsi que la réduction des lois de la sélection naturelle à celles de la physique (Rosenberg 2006, p. 42). Un tel programme est, par conséquent, solidaire de l'axiomatisation proposée par Williams (1970) et par Rosenberg (1985) lui-même, dans la mesure où elle se fonde précisément sur une définition axiomatique du principe de sélection naturelle (l'axiome *D4*) – que Rosenberg (1985) considérait comme étant analogue au deuxième principe de la thermodynamique –, sans y attribuer aucun contenu biologique spécifique. Nous pouvons donc interpréter l'absence de tout fondement génétique dans les axiomes de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) comme étant, du moins en partie, le résultat d'une volonté de subsumer, éventuellement, les principes qu'expriment ces mêmes axiomes sous des principes physiques de niveau supérieur, en « enjambant », pour ainsi dire, la génétique des populations.

Cela dit, nous pouvons également émettre l'hypothèse que l'absence de génétique qui caractérise l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) découlerait de la proximité entre la démarche qu'adoptaient ces derniers et la conception classique des théories scientifiques. En effet, si Williams (1970) et Rosenberg (1985) n'ont formulé aucun postulat de correspondance, ni aucun autre énoncé interprétatif, pour leurs axiomes, c'est précisément parce qu'ils entendaient exacerber l'une des caractéristiques fondamentales de la manière dont sont envisagés les concepts scientifiques, en tant que cadre conceptuel. Comme nous l'avons déjà remarqué à plusieurs reprises, la nature ouverte des concepts théoriques des sciences empiriques, tels qu'ils sont conçus dans le cadre de la conception classique, s'avère essentielle pour comprendre la dynamique qui caractérise un tel cadre conceptuel. Néanmoins, elle soulève également des doutes sur l'utilité de la reconstruction formelle, du moins telle que l'envisagent les approches syntaxiques, et notamment la conception classique des théories scientifiques. Comme nous le rappelle le cas spécifique de l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), la présentation d'une théorie scientifique sous la forme d'« un ensemble abstrait de postulats, accompagné d'un nombre approprié de règles de correspondance pour les termes non

logiques et non interprétés qui sont implicitement définis par les postulats » (« *an abstract set of postulates, augmented by an appropriate number of rules of correspondence for the uninterpreted nonlogical terms implicitly defined by the postulates* ») (Nagel 1961, p. 95), permet de saisir le fait que la signification des termes théoriques change au fur et à mesure que de nouvelles découvertes empiriques permettent de subsumer de nouveaux phénomènes sous les concepts que dénotent ces mêmes termes. Pour ce faire, il suffit d'ajouter à la reconstruction de la théorie de nouvelles règles de correspondance, qui représentent ainsi autant de nouvelles relations entre concepts et phénomènes – pourvu qu'elles ne soient pas incompatibles avec les règles qui ont déjà été établies, ou avec les postulats eux-mêmes⁴³³ – ou, plus généralement, d'étendre l'interprétation empirique que l'on a déjà attribuée à tel ou tel terme. De plus, une telle manière de présenter la structure d'une théorie donnée permet également de mieux identifier les contenus qu'elle véhicule, en faisant la part des choses entre ce qui relève en elle des mathématiques appliquées (c'est-à-dire sa structure syntaxique) et ce qui relève de son versant proprement empirique (c'est-à-dire son interprétation empirique), comme le démontre, toujours selon Carnap (1939), le fait que la reconstruction syntaxique que l'on peut faire de la mécanique (rationnelle) des points matériels permet, par ce même biais, d'éclaircir les rapports qu'entretient cette dernière avec la mécanique physique, ainsi que, plus généralement, les rapports qu'entretient la physique théorique avec la physique expérimentale⁴³⁴. Il n'en demeure, cependant,

⁴³³ « Un système de postulats ne peut donc pas avoir le splendide isolement [*splendid isolation*] des théories mathématiques par rapport au monde. Les notions axiomatiques qu'il contient, telles qu'« électron » [*electron*], « champ » [*field*], pour ne citer que celles-là, doivent être interprétées au moyen de règles de correspondance qui les relient à des phénomènes observables. Cette interprétation est nécessairement incomplète. Pour cette raison, le système reste ouvert : on peut y ajouter de nouvelles règles de correspondance [*This interpretation is necessarily incomplete. Because it is always incomplete, the system is left open to make it possible to add new rules of correspondence*]. C'est ce qui se passe constamment dans l'histoire de la physique » (Carnap 1966 ; 1973, p. 231).

⁴³⁴ « Par le biais de l'interprétation, les théorèmes du calcul de la mécanique [*theorems of the calculus of mechanics*] deviennent des lois physiques [*physical laws*], c'est-à-dire des énoncés universels qui décrivent certaines caractéristiques des événements ; ils constituent la mécanique physique en tant que théorie douée d'un contenu factuel [*physical mechanics as a theory with factual content*] qui peut être mis à l'épreuve des observations. La relation qu'entretient cette théorie avec le calcul de la mécanique est entièrement analogue [*entirely analogous*] à la relation qu'entretient la géométrie physique avec la géométrie mathématique. La division habituelle entre physique théorique et physique expérimentale [*The customary division into theoretical and experimental physics*] correspond *grosso modo* [*roughly corresponds*] à la distinction entre calcul logique et système interprété [*the distinction between calculus and interpreted system*]. La tâche du physicien théorique consiste principalement à construire des calculs et à en tirer des déductions : celle-ci est une tâche essentiellement mathématique [*The work of theoretical physics consists mainly in constructing calculi and carrying out deductions within them : this is essentially mathematical work*]. Dans la physique expérimentale, l'on interprète ces mêmes calculs et l'on teste les théories au moyen d'expériences » (Carnap 1939, p. 57).

pas moins vrai que cette même approche de la reconstruction rationnelle d'une théorie scientifique risque également d'obscurcir le contenu de son objet, en ceci qu'elle empêche toute compréhension intuitive des principes fondamentaux sur lesquels repose la théorie en question, en représentant de tels principes sous la forme d'énoncés qui expriment des relations purement formelles entre des entités quelconques – c'est-à-dire, précisément, sous la forme de postulats d'un système axiomatique non interprété. En conséquence, il devient également plus difficile de mobiliser une théorie dans sa formulation axiomatique, car une telle formulation canonique nous permet de comprendre le « comment » de la théorie qui est ainsi reconstruite – c'est-à-dire la manière dont cette dernière permet de mettre en relation des phénomènes de natures différentes, voire des phénomènes passés et des prédictions concernant des phénomènes futurs, en conformité avec la symétrie entre explication et prédiction que postule le schéma nomologico-déductif des arguments explicatifs qui est étroitement associé à la conception classique des théories scientifiques (Hempel & Oppenheim 1948 ; Hempel 1965) – mais non pas son « quoi » et son « pourquoi » – c'est-à-dire ce en quoi consistent les relations entre phénomènes qu'identifie la théorie en question, ainsi que les raisons pour lesquelles ces mêmes relations sont pertinentes pour comprendre les phénomènes concernés. En d'autres termes, reconstruire la structure d'une théorie scientifique d'après une conception syntaxique telle que celle qui sous-tend l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), ou bien d'après la conception classique des théories scientifiques, signifie traiter cette dernière, ainsi que la structure des phénomènes qu'elle entend décrire, comme s'il s'agissait d'une boîte noire qui produit un certain *output* (des prédictions ou des explications), de nature déterminée et complexe, en fonction d'une quantité donnée d'*inputs* (des données observationnelles ou expérimentales). Mais est-ce qu'une telle vision de la structure des théories scientifiques et de la nature des concepts qui y figurent est-elle réellement satisfaisante ?

Conclusion générale

Nous pouvons donc affirmer que, tout au long de cette thèse, nous avons affronté deux questions fondamentales. La première consiste à définir la notion même de cadre conceptuel, alors que l'autre est celle de savoir en quoi la théorie synthétique de l'évolution constituerait, justement, un cadre conceptuel pour les sciences de la vie, comme l'ont suggéré, entre autres, des partisans d'une extension de la Synthèse Moderne tels que Laland *et al.* (2014, 2015). Nous avons donc montré que ces deux questions, à l'apparence fort éloignées, sont liées l'une à l'autre dans la mesure où il est possible de se servir de la première pour éclairer la seconde, en résolvant, par ce même biais, les ambiguïtés qui sont associées à la définition de la théorie synthétique en tant qu'objet d'études pour les philosophes et pour les historiens de la biologie. Si l'on souhaite analyser de telles ambiguïtés à un niveau d'abstraction plus élevé, il est, en effet, particulièrement utile de les considérer au prisme des problématiques que permet de soulever le recours à la notion de cadre conceptuel, dans la mesure où ces dernières relèvent, comme nous avons tâché de le montrer dans les pages précédentes, des fondements mêmes de la philosophie générale des sciences. Néanmoins, de telles problématiques sont généralement associées à une famille d'approches épistémologiques bien définie, qui s'est construite sur la base de ce que Frederick Suppe (1977) a appelé l'« analyse des conceptions du monde » (« *Weltanschauungen analysis* ») qui sous-tendent l'activité scientifique. Les tenants d'une telle tradition dans l'histoire de la philosophie des sciences se sont, en effet, distingués par le fait qu'ils ont récusé non seulement l'idée qu'il serait possible de tracer une ligne de partage nette entre théorisation et expérience, mais également la distinction, introduite par Hans Reichenbach (1938), entre le « contexte de la découverte » (« *context of discovery* ») d'une théorie donnée et le « contexte de [sa] justification » (« *context of justification* »), (Suppe 1977, p. 125)⁴³⁵. Parmi de tels auteurs figurent, par exemple, Norwood Russell Hanson (1958, 1963), Stephen Toulmin (1972), Paul K. Feyerabend (1975), David Bohm (1987) et, surtout, Thomas Kuhn (1970a). Comme l'a observé, encore une fois, Suppe (1977), malgré toutes les différences qui les séparaient, ces divers auteurs s'accordaient tous pour considérer que « la tâche de la philosophie des sciences » (« *the job of the philosophy of science* ») consisterait à « analyser ce qui caractérise les conceptions scientifiques du monde [*'scientific Weltanschauungen'*], ce qui caractérise les systèmes linguistico-conceptuels [*'linguistic-conceptual systems'*] au sein desquels se produit » le savoir scientifique et se construit

⁴³⁵ Plus précisément, il s'agit de la distinction entre la manière dont un certain résultat scientifique ou mathématique est effectivement découvert et la manière dont ce même résultat est présenté et défendu, de manière logique et rationnelle, face à la communauté scientifique de référence (Suppe 1977, p. 125).

telle ou telle théorie particulière (Suppe 1977, p. 126), c'est-à-dire, précisément, à analyser et, le cas échéant, à construire des cadres conceptuels.

Dans cette thèse, nous avons cependant décidé d'aborder la question de définir ce qu'est un cadre conceptuel sous un angle différent, en nous servant de la « boîte à outil », pour ainsi dire, d'une autre tradition épistémologique, c'est-à-dire la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique. Ce faisant, nous sommes donc partis du présupposé que la conception de la science propre au Cercle de Vienne et les différentes « analyses des conceptions du monde » auraient constitué autant de manières distinctes d'envisager ce en quoi consistent les cadres au sein desquels se produit la croissance du savoir et se structurent les théories scientifiques. Par ce même biais, nous sommes donc parvenus à lier de manière étroite la question de savoir en quoi consiste un cadre conceptuel à un autre faisceau de problèmes, à savoir les problèmes que soulève l'interprétation de la conception classique des théories scientifiques en tant que conception, pour ainsi dire, « orthodoxe » des théories scientifiques qui a caractérisé, justement, la tradition du Cercle de Vienne et de l'empirisme logique. Plus précisément, le premier de ces problèmes est celui des sources qui ont nourri la conception scientifique du monde propre au Cercle de Vienne, et donc également la conception classique des théories scientifiques, notamment en ce qui concerne l'influence qu'ont pu exercer sur ces dernières l'école néokantienne de Marbourg (Cassirer *et al.* 2003), l'empirisme d'Ernst Mach (1883, 1886, 1905) et les conventionnalistes français (Poincaré 1902, 1905 ; Duhem 1906 ; Rey 1907). Le deuxième n'est rien d'autre que le problème que posent les différences qui existent entre les théories qui relèvent des sciences formelles – telles la théorie des ensembles et la théorie des corps – et celles qui relèvent des sciences empiriques – comme la théorie de la relativité. Un tel problème concerne, notamment, la conception classique dans la mesure où il est possible de l'inscrire dans la droite ligne du programme d'axiomatisation des mathématiques promu par l'école hilbertienne (Hilbert 1899, 1901, 1923). Le troisième problème consiste dans la manière dont les difficultés qui sont liées au présupposé qu'il existerait une distinction entre énoncés (scientifiques) analytiques et énoncés (scientifiques) synthétiques a fini par influencer sur la conception classique des théories scientifiques, notamment telle qu'elle a été développée par Rudolf Carnap (1939, 1956a, 1958, 1961a, 1963, 1966 ; Psillos & Carnap 2000).

En nous servant de la conception classique des théories scientifiques comme exemple paradigmatique de cadre conceptuel pour jeter un nouveau regard sur une telle notion, nous sommes donc parvenus, par ce même biais, à réunir ce faisceau de problématiques afin d'y apporter une réponse unique, dans une démarche qui est à la fois analytique et génétique. Plus précisément, la réponse que nous avons apportée à tous ces problèmes a consisté à élaborer une nouvelle lecture de la conception classique comme étant non seulement un cadre métalinguistique et métathéorique qui

permettrait de reconstruire les aspects formels de telle ou telle théorie scientifique, mais également un cadre qui impose des contraintes – de nature ontologique, épistémologique et conceptuelle – qui affectent la substance même de la théorie en question, c'est-à-dire l'architecture des concepts qui la structurent, ainsi que son contenu empirique. C'est en cela que réside, par conséquent, l'originalité et la pertinence de notre démarche, relativement à la première question fondamentale que nous avons affrontée dans cette thèse.

Quant à l'autre question que nous avons prise en considération – celle de savoir en quoi la théorie synthétique de l'évolution serait elle-même un cadre conceptuel – elle est indissociable d'une double problématique qui a trait à l'histoire et à la philosophie de la biologie. Il s'agit, plus précisément, de la problématique que constituent l'appréciation de la signification de la Synthèse Moderne, en tant que processus historico-institutionnel, et la reconstruction de la structure, ainsi que du contenu, de la théorie synthétique qui en serait issue. Comme nous l'avons observé plus haut, cette double problématique est ancrée dans la nature ambiguë de la Synthèse Moderne en tant qu'objet d'études pour les historiens et pour les philosophes de la biologie. La définition de la notion de cadre conceptuel que nous avons déduite de la conception classique des théories scientifiques nous a donc permis de mettre au jour une manière possible d'articuler les rapports qu'entretiennent les trois aspects de la Synthèse Moderne, au sens large du terme, que nous avons pu distinguer dans l'introduction de cette thèse : la Synthèse Moderne proprement dite, en tant que processus historico-institutionnel, la Synthèse Moderne en tant que théorie synthétique, au sens de théorie génétique de l'évolution par sélection naturelle, et la Synthèse Moderne en tant que théorie synthétique, au sens de cadre conceptuel pour les sciences de la vie.

Plus précisément, dans un premier moment, nous avons identifié deux hypothèses alternatives au sujet de la manière dont la théorie synthétique, aussi bien en tant que théorie génétique de l'évolution qu'en tant que cadre conceptuel, a pu émerger au cours du processus historique qu'a constitué la Synthèse Moderne dans la première acception du terme. En nous servant des contributions de Theodosius Dobzhansky (1951, 1970), nous avons donc pu mettre à l'épreuve ces deux hypothèses. Nous avons pu, notamment, confirmer la seconde, que nous avons dérivée à partir des réflexions de Provine (1971, 1977, 1980, 1986, 1989, 1998, 2001) et de Gould (1980a, 1980b, 1983, 1998, 2002). Une telle hypothèse consiste, en effet, à affirmer que la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel se serait constituée sur le fondement de la théorie synthétique en tant que théorie génétique de l'évolution, et donc sous la contrainte exercée par les modèles de la génétique théorique des populations. En conséquence, ce sont précisément les contributions de Dobzhansky (1951, 1970) qui nous ont permis de faire le lien entre le versant historico-génétique de la question de la nature de la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel, et le versant analytico-conceptuel de cette même

question. Dans ce but, nous nous sommes également appuyés sur deux tentatives de formalisation de la théorie de l'évolution qui sont communément associées à la conception classique, en tant qu'approche syntaxique des théories scientifiques, à savoir les axiomatisations qui ont été proposées par Michael Ruse (1973), ainsi que par Mary B. Williams (1970) et Alexander Rosenberg (1985). Ce faisant, nous avons tâché de montrer en quoi il serait possible de reconstruire formellement les contraintes que la génétique (théorique) des populations, en tant que théorie génétique de l'évolution, a fini par imposer à la théorie synthétique, en tant que cadre conceptuel.

C'est précisément pour de telles raisons que nous pouvons donc affirmer que le fait de poser la question de savoir en quoi il serait possible d'appliquer la définition de ce qu'est un cadre conceptuel que nous avons déduite de la conception classique des théories scientifiques au cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution nous a permis de résoudre l'ambiguïté qui est associée à la nature même de cette dernière, tout en reliant des problématiques qui relèvent de l'histoire et de la philosophie de la biologie, d'une part, à des problématiques qui relèvent de l'histoire et de la philosophie générale des sciences, d'autre part. Par conséquent, c'est en cela que consistent l'originalité et la pertinence de notre démarche par rapport à l'autre question fondamentale que nous avons affrontée dans cette thèse.

D'un point de vue méthodologique, nous pouvons remarquer, en outre, que nous avons adopté une démarche qui est, comme l'indique le titre de cette thèse, à la fois historique et philosophique et qui s'est articulée en trois grands moments. Au cours du premier moment, qui s'est déroulé dans la première partie de la thèse, nous avons, en effet, établi notre définition de ce qu'est un cadre conceptuel à partir d'une généalogie de la vision carnapienne de la conception classique des théories scientifiques. Ce faisant, nous avons donc pu formuler une définition de la notion de cadre conceptuel que l'on peut qualifier de « structuraliste », puisqu'elle repose sur le présupposé que la connaissance du monde empirique coïnciderait avec la connaissance des structures qui sous-tendent toute expérience phénoménique. Il s'ensuit que, d'après cette définition, la fonction des théories qui sont formulées au sein de tel ou tel cadre conceptuel consisterait, justement, à systématiser les contenus de la connaissance empirique au moyen de concepts qui sont de nature « ouverte », en ceci qu'ils ne sont pas réductibles à aucun ensemble fini de concepts logiques entièrement définis.

Une telle caractérisation de ce qu'est un cadre conceptuel est tout à fait cohérente avec les résultats de l'autre généalogie que nous avons tracée au cours du deuxième grand moment de notre démarche, dans le contexte de la seconde partie de la thèse : la généalogie de la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel telle qu'elle s'est constituée, comme nous l'avons rappelé plus haut, sous la contrainte des modèles mathématiques de la génétique (théorique) des populations. C'est précisément dans un tel sens que le versant historique de notre approche s'est avéré parfaitement complémentaire

à son versant philosophique, que nous avons achevé au cours du troisième moment, qui s'est déroulé, lui aussi, dans le cadre de la deuxième partie. En effet, comme nous l'avons avancé plus haut, c'est précisément au cours de cette dernière phase de notre raisonnement que nous avons mobilisé les axiomatisations qu'ont proposées Ruse (1973), Williams (1970) et Rosenberg (1985) afin d'appliquer notre définition structuraliste de la notion de cadre conceptuel au cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution. Mais quels ont donc été les résultats que nous avons obtenus par le biais d'une telle application ?

D'une part, nous avons pu en conclure que l'axiomatisation de la théorie de l'évolution qu'a proposée Michael Ruse (1973), dont nous nous sommes servis dans le cadre d'une première application de notre définition structuraliste de ce qu'est un cadre conceptuel à la théorie synthétique, permet de saisir la conception « mendéliée » de l'évolution qu'incarnent les présupposés de la loi de Hardy-Weinberg (Hardy 1908 ; Weinberg 1908), et que l'on peut également retrouver chez Dobzhansky (1937, 1941, 1951, 1970). D'autre part, nous sommes également parvenus à la conclusion que cette axiomatisation ne permet pas de saisir les rapports qui relient la dimension génétique de la sélection naturelle, en tant que facteur évolutif, à sa dimension phénotypique. C'est précisément pour une telle raison que nous nous sommes tournés vers l'axiomatisation de Williams (1970) et de Rosenberg (1985), que nous avons comparée avec la conception du principe de sélection naturel, en tant que schématisme à caractère nomologique, qui se dégage de la façon dont Elliott Sober (1984a) a caractérisé la théorie de l'évolution en tant que théorie des forces. Cette comparaison nous a permis de mettre en relation l'une des principales critiques qui ont été formulées à l'encontre de Williams (1970) et de Rosenberg (1985) avec une caractéristique fondamentale de la conception classique des théories scientifiques elle-même. Il s'agit, plus précisément, de l'objection d'après laquelle l'axiomatisation qu'ont proposée ces derniers manquerait de tout fondement génétique, ce qui en ferait une formalisation non adéquate de la théorie darwinienne de l'évolution sous toutes ses formes. Nous avons donc mis en relation ce problème particulier que soulève l'axiomatisation de Williams (1970) et Rosenberg (1985) avec le fait que la conception classique, ainsi que la définition de la notion de cadre conceptuel que nous en avons déduite comportent une vision des théories scientifiques comme étant, pour ainsi dire, des « boîtes noires ».

Comme le suggère Hempel (1966), l'analogie entre la structure d'une théorie scientifique et celle d'une boîte noire vaut autant que la distinction entre phénomènes empiriquement observables et entités non observables qu'elle présuppose. Lorsqu'on veut étudier le fonctionnement d'une boîte noire, écrit Hempel (1966), l'on peut adopter soit une approche indirecte, soit une approche directe. La première approche consiste, plus précisément, à « hasarder une hypothèse concernant la structure de la boîte – peut-être en invoquant la présence de roues, d'engrenages, de cliquets ou bien de fils, de

tubes à vide et de courants » (« *venture a hypothesis about the internal structure of the box – perhaps in terms of wheels, gears, and ratchets, or in terms of wires, vacuum tubes, and currents* ») – et à tester une telle hypothèse « en faisant varier les incitations (*inputs*) et en relevant les réactions (*outputs*) correspondantes » (« *by varying the inputs and checking the corresponding outputs* ») (Hempel 1966 ; 2012, p. 146-147). La seconde consiste, en revanche, à émettre une hypothèse que l'on vérifiera, par la suite, en ouvrant directement la boîte en question. L'intérêt de l'analogie avec une boîte noire consiste précisément en ceci qu'elle nous permet d'imaginer comment l'on pourrait s'y prendre pour formuler et pour tester une théorie en tant que description de la structure non observable de faits observables : chaque fois qu'il n'est pas possible d'ouvrir directement la boîte pour en décrire le contenu, il est nécessaire d'en étudier la structure de manière indirecte, en faisant jouer les *inputs* et les *outputs*. C'est précisément ce que l'on fait lorsqu'on reconstruit la structure d'une théorie scientifique comme s'il s'agissait d'une structure syntaxique non interprétée. Nous pouvons donc en conclure que la compréhension d'une théorie scientifique donnée nécessite souvent la mise en relation de concepts et d'entités qui relèvent de théories ou de domaines différents, ce qui implique de tisser une trame d'analogies, soit matérielles, soit purement formelles (Nagel 1961 ; Hesse 1966 ; Bartha 2019) entre ces mêmes entités et ces mêmes concepts.

Dans le cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, cela signifie que, lorsqu'on la considère à la lumière de la conception classique des théories scientifiques, force en est de constater que, afin d'en comprendre la signification et la portée explicative, il est nécessaire d'établir des analogies entre des concepts et des entités qui relèvent de différentes branches des sciences de la vie, ainsi que de différents niveaux d'intégration du vivant ou de différentes échelles du processus évolutif. C'est précisément en cela que la conception classique des théories scientifiques permet de mettre au jour ce qui caractérise, à notre sens, la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie, c'est-à-dire le fait qu'elle vise à mettre en relation différents niveaux d'intégration du vivant et différents pans des sciences de la vie en se servant du principe de sélection naturel comme un puissant principe unificateur dont la fonction épistémique consiste, justement, à établir des liens analogiques (voire homologues) entre les versants les plus divers du monde organique. Pour une telle raison, nous pouvons en conclure que, malgré les différentes critiques dont elle a pu faire l'objet, la conception classique des théories scientifiques constitue un cadre analytique pertinent pour la compréhension et pour la reconstruction de la théorie synthétique.

Il s'ensuit également que c'est précisément la détermination de ces mêmes liens d'analogie (ou d'homologie), notamment entre l'évolution génétique et l'évolution phénotypique (à différents niveaux de complexité), qui permettrait de dépasser les difficultés que nous avons relevées lorsque

nous avons analysé les axiomatisations de Ruse (1973) et de Williams-Rosenberg (Williams 1970 ; Rosenberg 1985). En effet, c'est à la lumière des problèmes que soulève la tâche de caractériser, de manière formellement et matériellement adéquate, de telles relations analogiques que nous pouvons comprendre les raisons pour lesquelles, après avoir critiqué les deux tentatives de formalisation de la théorie de l'évolution que nous venons de mentionner, Paul Thompson (1989) a pu affirmer qu'il serait nécessaire d'abandonner la conception classique des théories scientifiques, ainsi que toute autre conception syntaxique, pour se tourner vers une autre famille d'approches formelles de la reconstruction du savoir que nous avons évoquée dans le cadre de cette thèse. Il s'agit, notamment, de ce qu'on appelle communément les « approches sémantiques », qui consistent à envisager les théories scientifiques comme étant des familles de modèles, et donc des familles de structures mathématiques qu'il serait question de mettre en relation avec des systèmes physiques. Thompson (1989) a avancé, en effet, qu'« un cadre théorique évolutionniste » (« *an evolutionary theoretical framework* »), tel que la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel, « constitue une famille de théories qui interagissent entre elles [et notamment d'au moins trois théories distinctes, mais complémentaires : une théorie de l'hérédité, une théorie de la variation et une théorie de la sélection] plutôt qu'une structure unifiée » (« *is a family of interacting theories rather than a unified structure* ») (Thompson 1989, p. 67). En conséquence, ce serait justement pour une telle raison que les approches sémantiques seraient beaucoup plus fécondes que les approches syntaxiques lorsqu'il serait question de reconstruire formellement la structure et le contenu de la théorie synthétique de l'évolution, aussi bien en tant que théorie génétique qu'en tant que cadre conceptuel, comme en témoignerait le fait que les axiomatisations de Ruse (1973) et de Williams-Rosenberg (Williams 1970 ; Rosenberg 1985) ne sont pas à même de porter un regard synoptique sur les trois aspects qu'a évoqués Thompson (1989).

Néanmoins, si nous analysons de plus près les arguments qu'a présentés ce dernier – comme nous l'avons fait dans le cadre du chapitre final de cette thèse – nous pouvons nous apercevoir que leur portée est beaucoup plus circonscrite. Dans le cas de l'axiomatisation de Ruse (1973), Thompson (1989) a reproché à cette dernière de mettre au premier plan une vision génétique et extrapolationniste – en ce qui concerne les rapports entre microévolution et macroévolution – des phénomènes évolutifs, alors que, dans celui de l'axiomatisation de Williams-Rosenberg (Williams 1970 ; Rosenberg 1985), Thompson (1989) s'est limité à observer que leur interprétation de l'hypothèse de la sélection naturelle en fait un principe très abstrait. Sur la base de ces considérations, nous pouvons donc en conclure que l'analyse de la théorie synthétique de l'évolution, en tant que cadre conceptuel, que nous avons menée tout au long de cette thèse, d'un point de vue aussi bien historique que philosophique, nous permet de proposer une réponse aux critiques de Thompson (1989).

Comme nous l'avons montré au fil des pages précédentes, l'importance primordiale des fondements génétiques de l'évolution, la conception des grandes tendances macro-évolutives comme prolongements de processus micro-évolutifs et l'interprétation de l'hypothèse de la sélection naturelle comme étant un principe d'unification très abstrait et très général constituent autant de traits marquants de la théorie synthétique de l'évolution en tant que cadre conceptuel pour les sciences de la vie. Il en découle que, si l'on souhaite critiquer telle ou telle reconstruction formelle de la théorie synthétique à l'aune de la conception classique des théories scientifiques précisément en raison de ces trois caractéristiques, il est nécessaire de critiquer la théorie synthétique en tant que telle. Autrement dit, la manière dont nous avons reformulé la conception classique des théories scientifiques afin de nous en servir pour clarifier en quoi consiste la théorie synthétique comme cadre conceptuel nous permet d'en conclure que les arguments de Thompson (1989) relèvent moins du domaine de la reconstruction formelle de la théorie de l'évolution que de celui de la critique des possibles interprétations de cette dernière.

Nous pouvons donc en conclure que, au lieu de remettre en question la pertinence de la conception classique des théories scientifiques comme cadre analytique pour la reconstruction et la compréhension de la théorie synthétique, les critiques de Thompson (1989) nous donnent les moyens de mettre au jour la valeur dialectique, et non seulement analytique, dont peut faire preuve une telle approche des théories scientifiques lorsqu'elle est appliquée au domaine de la biologie de l'évolution. Plus précisément, de telles critiques nous donnent l'occasion de montrer en quoi la conception classique peut apporter une contribution à ce même mouvement de problématisation et de rectification de la théorie de l'évolution dont est issue la théorie synthétique elle-même. Par cela, nous entendons affirmer que, en tant que cadre conceptuel structuraliste, la conception classique des théories scientifiques permet de faire émerger la double structure que présuppose l'architecture des concepts propre à la théorie synthétique : d'une part, la structure formelle qui se fonde sur les modèles mathématiques de la génétique des populations dite « classique » ; d'autre part, la structure empirique de l'évolution, en tant que processus naturel, qui sous-tend une telle structure formelle. Ensuite, nous pouvons également en conclure les analyses que nous avons développées au fil des pages précédentes nous fournissent des arguments en faveur de la nécessité d'une ultérieure rectification, toujours au sens bachelardien du terme, de la théorie synthétique de l'évolution, notamment en ce qui concerne les relations entre évolution génétique et évolution phénotypique. Plus précisément, notre travail permet de parvenir, à partir d'un point de vue très différent, à la même conclusion qu'ont suggérée des partisans d'une extension de la théorie synthétique, tels que Kevin Laland, Tobias Uller, Eva Jablonka et d'autres encore (Laland *et al.* 2014, 2015), au sujet des relations causales entre gènes et phénotypes. Le cadre de la théorie synthétique nous contraint, notamment, à concevoir de telles

relations sur le modèle d'un rapport de causalité unidirectionnelle, alors que la tension entre les différentes formalisations possibles du principe de sélection naturelle que nous avons mises en lumière grâce à notre analyse de l'axiomatisation de Ruse (1973), ainsi que de celle de Williams (1970) et Rosenberg (1985), montre toutes les limites d'une telle conception, quand bien même on la considérerait à l'aune des présupposés mêmes de la Synthèse Moderne. De plus, en explicitant le rapport étroit qui existe entre l'architecture conceptuelle d'une théorie donnée et la structure formelle dont il est possible de la doter, cette thèse permet également de mettre au jour le fait qu'une telle rectification impliquera, à son tour, l'usage d'autres outils formels que ceux qu'ont généralement employés les philosophes qui se sont intéressés à la reconstruction rationnelle des théories scientifiques. Plus précisément, le formalisme élémentaire que nous avons développé dans le but d'analyser les concepts dobzhanskyens de norme de réaction et de norme adaptative, dans une perspective inspirée par la conception classique, révèle les limites d'une vision des systèmes biologiques comme systèmes conservatifs que l'on pourrait étudier relativement à un certain état d'équilibre, quoique purement théorique. En cela, les conclusions auxquelles nous sommes parvenus à la suite de ce travail sont susceptibles d'ouvrir de nouvelles pistes de réflexion non seulement dans le domaine de la reconstruction formelle de la théorie de l'évolution, en tant qu'outil d'analyse philosophique, mais également dans celui de la biologie théorique.

Bibliographie

- ACKERMANN, W. (1924). Die Widerspruchsfreiheit des Auswahlaxioms. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen 1924*, 246–250.
- ACKERMANN, W. (1925). Begründung des „tertium non datur“ mittels der Hilbertschen Theorie der Widerspruchsfreiheit. *Mathematische Annalen*, 93, 1–36.
- ADAMS, M. B. (1990). Filipchenko [Filipitschenko], Iurii Aleksandrovich. Dans HOLMES, F. L. (dir.) (1990). *Dictionary of Scientific Biography*. (Volume 17). New York, N. Y.: Charles Scribner's Sons.
- ALEXANDROV, D. A. (2014). Filipchenko and Dobzhansky: Issues in Evolutionary Genetics in the 1920s. Dans ADAMS, M. B. (2014). *The Evolution of Theodosius Dobzhansky*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- ALLABY, M. (1999). *A Dictionary of Zoology*. Oxford: Oxford University Press.
- ALLEN, G. E. (2013). The History of Evolutionary Thought. Dans LOSOS, J. B. (2013). *The Princeton Guide to Evolution*. Princeton, N. J.: Princeton University Press. 1ère édition.
- ALLISON, A. C. (1954). Protection Afforded by Sickle-cell Trait Against Subtertian Malarial Infection. *British Medical Journal*, 1(4587), 290-294. [10.1136/bmj.1.4857.290](https://doi.org/10.1136/bmj.1.4857.290)
- ANDREWS, P. B. (2002). *An Introduction to Mathematical Logic and Type Theory: To Truth through Proof*. Dordrecht-Boston-Londres: Kluwer Verlag. 2ème édition.
- ARENDT, D., *et al.* (2009). The “division of labour” model of eye evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1531), 2809–2817. 10.1098/rstb.2009.0104.
- AYALA, F. J. (1982). Beyond Darwinism? The Challenge of Macroevolution to the Synthetic Theory of Evolution. *Philosophy of Science*, 2, 275-291. 10.1086/psaprocbienmeetp.1982.2.192425
- AWODEY, S. (2006). *Category Theory*. Oxford: Oxford University Press.
- BACHELARD, G. (1938). *La Formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Paris : Vrin.
- BACHELARD, G. (1940). *La Philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.

- BAGARIA, J. (2019). Set Theory. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
<https://plato.stanford.edu/entries/set-theory/>
- BAILEY, N. W. (2012). Evolutionary models of extended phenotypes. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(10), 561-569. [10.1016/j.tree.2012.05.011](https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.05.011)
- BARASH, D. P. (1976). Male response to apparent female adultery in the mountain bluebird: an evolutionary interpretation. *American Naturalist*, 110(976), 1097-1101. [10.1086/283129](https://doi.org/10.1086/283129)
- BARTHA, P. (2019). Analogy and Analogical Reasoning. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
<https://plato.stanford.edu/entries/reasoning-analogy/>
- BATESON, W. (1894). *Materials for the Study of Variation*. New York, N. Y.: Macmillan.
- BATESON, W. (1902). *Mendel's Principles of Heredity. A Defence*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BATESON, W. (1909). Heredity and variation in modern lights. Dans SEWARD, A. C. (dir.). (1909). *Darwin and Modern Science*. Cambridge University Press: Cambridge.
- BATESON, W. (1913). *Problems of Genetics*. New Haven, CT: Yale University Press.
- BAUR, E. (1910). Vererbungs- und Bastardisierungsversuche mit Antirrhinum. *Zeitschrift für Induktive Abstammungs- und Vererbungslehre*, 3, 34-98.
- BAUR, E. (1921). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Pflanzenzüchtung: Ein Lehrbuch für Landwirte, Gärtner und Forstleute*. Berlin.
- BAUR, E. (1925). Die Bedeutung der Mutationen für das Evolutionsproblem. *Zeitschrift für Induktive Abstammungs- und Vererbungslehre*, 37, 107-115.
- BAUR, E. (1930). *Einführung in die Vererbungslehre*. Berlin: Borntraeger Verlag.
- BEATTY, J. (1980a). Optimal-design models and the strategy of model building in evolutionary biology. *Philosophy of Science*, 47(4), 532-561. [10.1086/288955](https://doi.org/10.1086/288955)
- BEATTY, J. (1980b). What's Wrong with the Received View of Evolutionary Theory? ASQUITH, P. D., GIERE, R. N. (dir.) (1980). *PSA 1980*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- BEATTY, J. (1986). The Synthesis and the Synthetic Theory. Dans BECHTEL, W. (dir.) (1986). *Integrating Scientific Disciplines*. La Haye: Nijhoff.
- BEATTY, J. (1987). On Behalf of the Semantic View. *Biology and Philosophy*, 2, 17-23.
[10.1007/BF00127560](https://doi.org/10.1007/BF00127560)

- BECKNER, M. (1959). *The Biological Way of Thought*. Los Angeles: University of California Press.
- BEISER, F. (2015). *The Genesis of Neo-Kantianism: 1796-1880*. Oxford: Oxford University Press.
- BELL, D. (1979). *Frege's Theory of Judgment*. Oxford: Clarendon.
- BERNAYS, P. (1938). Über die aktuelle Methodenfrage der Hilbertschen Beweistheorie. Manuscript non publié.
- BIALOBRZESKI, C., et al. (1939). *Les Nouvelles théories de la physique*. Paris : Institut international de coopération intellectuelle.
- BOHM, D. (1987). *Science, Order, and Creativity*. Londres: Routledge.
- BOHR, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical Magazine*, 26, 1-24.
- BOHR, N. (1914). On the effect of electric and magnetic fields on spectral lines. *Philosophical Magazine*, 27, 506-524.
- BOHR, N. (1921). Atomic structure. *Nature*, 108, 208-209.
- BOLZANO, B. (1837). *Wissenschaftslehre*. Sulzbach: Seidel Verlag.
- BONNET, C., WAGNER, P. (dir.) (2006). *L'âge d'or de l'empirisme logique. Vienne-Berlin-Prague. 1929-1936*. Paris : Gallimard.
- BOOLE, G. (1854). *An Investigation of the Laws of Thought*. Londres: Walton & Maberly.
- BORGES, R. M. (2005). Ernst Mayr and evolutionary biology: Polemics and synthesis. *Current Science*, 89(6), 947-952.
- BOURBAKI, N. (1970). *Éléments de mathématiques. Théorie des ensembles*. Paris : Hermann.
- BOURBAKI, N. (1984). *Éléments d'histoire des mathématiques*. Paris : Masson.
- BOURGUET, D. (2001). Évolution de la dominance : conséquence physiologique de la sélection naturelle. *Revue Médecine/Science (Paris)*, 17(8-9), I-IX. [10608/2043](#)
- BOUVERESSE, J. (2011). *Essais VI. Les Lumières des positivistes*. Paris : Agone.
- BOUVERESSE, J., WAGNER, P. (dir.) (2008). *Mathématiques et expérience. L'empirisme logique à l'épreuve (1918-1940)*. Paris : Odile Jacob.
- BOWLER, P. J. (1983). *The Eclipse of Darwinism: Anti-Darwinian Evolution Theories in the Decades around 1900*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- BOWLER, P. J. (1988). *The non-Darwinian Revolution. Reinterpreting a Historical Myth*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.

- BOWLER, P. J. (2003). *Evolution. The History of an Idea*. Los Angeles, CA: University of California Press. 3ème édition.
- BRAITHWAITE, R. B. (1953). *Scientific explanation: A study of the function of theory, probability and law in science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BRANDL, J. (2018). Brentano's Theory of Judgement. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/brentano-judgement/>
- BRANDON, R. N., NIJHOUT, H. F. (2006). The Empirical Nonequivalence of Genic and Genotypic Models of Selection: A (Decisive) Refutation of Genic Selectionism and Pluralistic Genic Selectionism. *Philosophy of Science*, 73(3), 277-297. [10.1086/515416](https://doi.org/10.1086/515416)
- BRENTANO, F. (1874). *Psychologie vom empirischen Standpunkte*. Leipzig: Duncker & Humblot Verlag.
- BRIDGMAN, P. W. (1927). *The Logic of Modern Physics*. New York, N. Y.: Macmillan.
- BRIDGMAN, P. W. (1936). *The Nature of Physical Theory*. Dover: OCLC.
- BRIDGMAN, P. W. (1938). Operational Analysis. *Philosophy of Science*, 5(2), 114-131. [10.1086/286496](https://doi.org/10.1086/286496)
- BRIDGMAN, P. W. (1945). Some General Principles of Operational Analysis. *Psychological Review*, 52(5), 246-249. [10.1037/h0060381](https://doi.org/10.1037/h0060381)
- BRIDGMAN, P. W. (1951a). The Nature of Some of our Physical Concepts, I. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1(4), 257-272. [10.1093/bjps/I.4.257](https://doi.org/10.1093/bjps/I.4.257)
- BRIDGMAN, P. W. (1951b). The Nature of Some of our Physical Concepts, II. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2(5), 25-44. [10.1093/bjps/II.5.25](https://doi.org/10.1093/bjps/II.5.25)
- BRIDGMAN, P. W. (1951c). The Nature of Some of our Physical Concepts, III. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2(6), 142-160. [10.1093/bjps/II.6.142](https://doi.org/10.1093/bjps/II.6.142)
- BRIGANDT, I., LOVE, A. (2017). Reductionism in Biology. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/reduction-biology/>
- BRISSON, L. (2020). *Platon: Oeuvres complètes*. Paris : Flammarion.
- BROUWER, L. E. J. (1908). De onbetrouwbaarheid der logische principes. *Tijdschrift voor Wijsbegeerte*, 2, 152-158.
- BROUWER, L. E. J. (1912). *Intuitionisme en formalism*. Amsterdam: Clausen.

- BROUWER, L. E. J. (1913). Intuitionism and formalism. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 20, 81-96.
- BROUWER, L. E. J. (1917). Addenda en corrigenda over de grondslagen der wiskunde. *Nieuw Archief voor Wiskunde*, 12, 439-445.
- BROUWER, L. E. J. (1923). Über die Bedeutung des Satzes vom ausgeschlossenen Dritten in der Mathematik, insbesondere in der Funktionentheorie. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 154, 1-7.
- BROUWER, L. E. J. (1928). Intuitionistische Betrachtungen über den Formalismus. *KNAW Proceedings*, 31, 374-379.
- BROUWER, L. E. J. (1930). *Die Struktur des Kontinuums*. Gistel Verlag.
- BROUWER, L. E. J. (1947). Richtlijnen der intuitionistische wiskunde. *Indagationes Mathematicae*, 9(197), p.477.
- BROUWER, L. E. J. (1948). Consciousness, philosophy and mathematics. *Proceedings of the 10th International Congress of Philosophy, Amsterdam 1948*. 1235-1249.
- BROUWER, L. E. J. (1952). Historical background, principles and methods of intuitionism. *South African Journal of Science*, 49, 139-146.
- BROUWER, L. E. J. (1954). Points and spaces. *Canadian Journal of Mathematics*, 6, 1-17.
- BURALI-FORTI, C. (1897). Una questione sui numeri transfiniti. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 11, 154-164.
- BURIAN, R. M. (1985). *Epistemology of Development, Evolution, and Genetics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BURIAN, R. M. (1988). Challenges to the Evolutionary Synthesis. *Evolutionary Biology*, 23, 247-269.
- BUZZATI-TRAVERSO, A., JUCCI, C., TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1938). Genetica di popolazioni. Consiglio Nazionale delle Ricerche. *La ricerca scientifica*, série 2, volume 1, 3-30.
- CAIN, J. (1993). Common Problems and Cooperative Solutions: Organizational Activity in Evolutionary Studies, 1936-1947. *Isis*, 84, 1-25. [10.1086/356371](https://doi.org/10.1086/356371)
- CAIN, J. (2001). The Columbia Biological Series, 1894-1974: a bibliographic note. *Archives of Natural History*, 28(3), 353-366. [10.3366/anh.2001.28.3.353](https://doi.org/10.3366/anh.2001.28.3.353)

- CAIN, J. (2002). Epistemic and community transition in American evolutionary studies: the “Committee on Common Problems of Genetics, Paleontology, and Systematics” (1942-1949). *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 33(2), 283-313. [10.1016/S0039-3681\(02\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0039-3681(02)00019-5)
- CAIN, J. (2004). Exploring the borderlands: documents of the Committee on Common Problems of Genetics, Paleontology, and Systematics, 1943-1944. *Transactions of the American Philosophical Society*, 94.
- CAIN, J. (2009). Rethinking the Synthesis Period in Evolutionary Studies. *Journal of the History of Biology*, 42, 621-648. [10.1007/s10739-009-9206-z](https://doi.org/10.1007/s10739-009-9206-z)
- CAIN, J. (2010). Julian Huxley, General Biology and the London Zoo, 1935-42. *Notes and Records of the Royal Society*, 64, 359-378. [10.1098/rsnr.2010.0067](https://doi.org/10.1098/rsnr.2010.0067)
- CALLEBAUT, W. (1993). *Taking the Naturalistic Turn, or How Real Philosophy of Science is Done*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- CALLEBAUT, W. (1995). Réduction et explication mécaniste en biologie. *Revue Philosophique de Louvain*, 93(1), 33-66. [10.2143/RPL.93.1.541824](https://doi.org/10.2143/RPL.93.1.541824)
- CALLEBAUT, W. (2005). Again, What the Philosophy of Biology is not. *Acta Biotheoretica*, 53, 93-122. [10.1007/s10441-005-5352-7](https://doi.org/10.1007/s10441-005-5352-7)
- CALLEBAUT, W. (2012). Scientific perspectivism: A philosopher of science’s response to the challenge of big data biology. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 43(1), 69-80. [10.1016/j.shpsc.2011.10.007](https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2011.10.007)
- CALLEBAUT, W. (2013). Naturalizing Theorizing: Beyond a Theory of Biological Theories. *Biological Theory*, 7(4), 413-429. [10.1007/s13752-013-0122-2](https://doi.org/10.1007/s13752-013-0122-2)
- CANGUILHEM, G. (1963). Dialectique et Philosophie du Non chez Gaston Bachelard. *Revue Internationale de Philosophie*, vol. 17, 66(4), 441-452.
- CANGUILHEM, G. (1966). *Le Normal et le pathologique*. Paris : PUF.
- CANTINI, A. (2009). Paradoxes, Self-Reference and Truth in the 20th Century. GABBAY, D. M., et al. (dir.) (2009).
- CANTOR, G. (1883). Fondements d’une théorie générale des ensembles. (Traduit par J. C. Milner). *Mathematische Annalen*, XXI, 545-586.

- CARNAP, R. (1928). *Der Logische Aufbau der Welt*. Berlin: Weltkreis Verlag. 1ère édition.
- CARNAP, R. (1932a). Überwindung der Metaphysik durch logische Analyse der Sprache. *Erkenntnis*, 2, 219-241. [10.1007/BF02028153](https://doi.org/10.1007/BF02028153)
- CARNAP, R. (1932b). Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft. *Erkenntnis*, 2, 432-465. [10.1007/BF02028172](https://doi.org/10.1007/BF02028172)
- CARNAP, R. (1932c). Über Protokollsätze. *Erkenntnis*, 3, 215-228. [10.1007/BF01886421](https://doi.org/10.1007/BF01886421)
- CARNAP, R. (1934). *Die logische Syntax der Sprache*. Vienne: Springer Verlag.
- CARNAP, R. (1936a). Von der Erkenntnistheorie zur Wissenschaftslogik. Dans *Actes du Congrès International de Philosophie Scientifique, Paris 1935. Unité de la science*. Paris : Hermann.
- CARNAP, R. (1936b). Testability and Meaning. *Philosophy of Science*, 3(4), 419-471. [10.1086/286432](https://doi.org/10.1086/286432)
- CARNAP, R. (1936c). Wahrheit und Bewährung. Dans *Actes du Congrès International de Philosophie Scientifique, Paris 1935. Unité de la science*. Paris : Hermann.
- CARNAP, R. (1937). Testability and Meaning. *Philosophy of Science*, 4(1), 1-40. [10.1086/286443](https://doi.org/10.1086/286443)
- CARNAP, R. (1938). Logical Foundations of the Unity of Science. Dans NEURATH, O., *et al.* (1938). *Encyclopedia and Unified Science*. Chicago, IL : University of Chicago Press.
- CARNAP, R. (1939). *Foundations of Logic and Mathematics*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- CARNAP, R. (1942). *Introduction to Semantics*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- CARNAP, R. (1945a). On Inductive Logic. *Philosophy of Science*, 12(2), 72-97. [10.1086/286851](https://doi.org/10.1086/286851)
- CARNAP, R. (1945b). The Two Concepts of Probability: The Problem of Probability. *Philosophy and Phenomenological Research*, 5(4), 513-532. [10.2307/2102817](https://doi.org/10.2307/2102817)
- CARNAP, R. (1947). *Meaning and Necessity*. Chicago, IL: The University of Chicago Press. 1ère édition.
- CARNAP, R. (1950a). *Logical Foundations of Probability*, first edition, Chicago, IL: University of Chicago Press.
- CARNAP, R. (1950b). Empiricism, Semantics, and Ontology. *Revue Internationale de Philosophie*, 4(11), 20-40. [10.2307/j.ctvcm4fzv.20](https://doi.org/10.2307/j.ctvcm4fzv.20)
- CARNAP, R. (1952). Meaning Postulates. *Philosophical Studies*, 3(5), 65-73. [10.1007/BF02350366](https://doi.org/10.1007/BF02350366)

- CARNAP, R. (1956a). *Meaning and Necessity*. Chicago, IL: The University of Chicago Press. 2ème édition.
- CARNAP, R. (1956b). The Methodological Character of Theoretical Concepts. Dans FEIGL, H., SCRIVEN, M. (dir.) (1956). *The Foundations of Science and the Concepts of Psychology and Psychoanalysis*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- CARNAP, R. (1958). Beobachtungssprache und Theoretische Sprache. *Dialectica*, 12(3-4), 236-248. 10.1111/j.1746-8361.1958.tb01461.x
- CARNAP, R. (1961a). On the Use of Hilbert's ϵ -Operator in Scientific Theories. Dans BARHILLEL, Y. (dir.) (1961). *Essays on the Foundations of Mathematics*. Jerusalem: Magnes Press.
- CARNAP, R. (1961b). *Der Logische Aufbau der Welt*. Hambourg: Felix Meiner Verlag. 2ème édition.
- CARNAP, R. (1963). The Philosopher Replies. Dans SCHILPP, P. A. (dir.) (1963).
- CARNAP, R. (1966). *Philosophical Foundations of Physics: An Introduction to the Philosophy of Science*. New York, N. Y.: Basic Books.
- CARNAP, R. (1973). *Les Fondements philosophiques de la physique*. (Traduit par Jean-Mathieu Luccioni et Antonia Soulez). Paris : Armand Colin.
- CARNAP, R. (1997). *Signification et nécessité. Une recherche en sémantique et en logique modale*. (Traduit par François Rivenc et Philippe de Rouilhan). Paris: Gallimard.
- CARNAP, R. (2002). *La Construction logique du monde*. (Traduit par Elisabeth Schwartz et Thierry Rivain). Paris: Vrin.
- CARNAP, R. (2015a). *Testabilité et signification*. (Traduit par Yann Benétreau-Dupin). Paris : Vrin.
- CARNAP, R. (2015b). *Logique inductive et probabilité. 1945-1970*. (Traduit sous la direction de Pierre Wagner). Paris : Vrin.
- CARNAP, R., et al. (1929). *Wissenschaftliche Weltauffassung Der Wiener Kreis*. Vienne: Artur Wolf Verlag.
- CASSIRER, E. (1906). *Der kritische Idealismus und die Philosophie des „gesunden Menschenverstandes“*. Gießen: Töpelmann.
- CASSIRER, E. (1907). Kant und die moderne Mathematik. *Kant-Studien*, 12, 1-40.
- CASSIRER, E. (1912). Hermann Cohen und die Erneuerung der kantische Philosophie. *Kant-Studien*, 17, 252-273.

- CASSIRER, E. (1921). *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie. Erkenntnistheoretische Betrachtungen*. Berlin: Cassirer Verlag.
- CASSIRER, E. (1923-1929). *Philosophie der symbolischen Formen*. (3 Volumes). Berlin: Cassirer Verlag.
- CASSIRER, E., et al. (1998). *L'École de Marbourg*. Paris : Éditions du Cerf.
- CASTLE, W. E. (1916). Further studies of piebald rats and selection, with observations on gametic coupling. *Carnegie Institution of Washington Publication*, 241, 163-192.
- CASTLE, W. E. (1919). Piebald rats and the theory of genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 5(4), 126-130. [10.1073/pnas.5.4.126](https://doi.org/10.1073/pnas.5.4.126)
- CASTLE, W. E., PHILLIPS, J. C. (1914). Piebald rats and selection: An experimental test of the effectiveness of selection and of the theory of gametic parity in Mendelian crosses. *Carnegie Institution of Washington Publication*, 195.
- CASTLE, W. E., WRIGHT, S. (1915). Two color mutations of rats which show partial coupling. *Science*, 42(1075), 193-195. [10.1126/science.42.1075.193](https://doi.org/10.1126/science.42.1075.193)
- CAT, J. (2017). The Unity of Science. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/scientific-unity/>
- CHAPMAN, F. M. (1923). Mutation among birds in the genus *Buarremon*. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, 43, 243-278.
- CHRISTIANIDIS, J. (2004). *Classics in the History of Greek Mathematics*. Dordrecht: Springer.
- CHURCH, A. (1940). A formulation of the simple theory of types. *Journal of Symbolic Logic*, 5(2), 56-68. [10.2307/2266170](https://doi.org/10.2307/2266170)
- CHURCH, A. (1977). Comparison of Russell's resolution of the semantical antinomies with that of Tarski. *The Journal of Symbolic Logic*, 41(4), 747-760. [10.2307/2272393](https://doi.org/10.2307/2272393)
- CHWISTEK, L. (1921). Antynomje Logiki Formalnej. *Przegląd Filozoficzny*, 24, 164-171.
- CHWISTEK, L. (1922). Über die Antinomien der Prinzipien der Mathematik. *Mathematische Zeitschrift*, 14, 236-243.
- COFFA, J. A. (1991). *The Semantic Tradition from Kant to Carnap: To the Vienna Station*. (Édité par L. Wessels). Cambridge: Cambridge University Press.
- COHEN, H. (1871). *Kants Theorie der Erfahrung*. Berlin: Dümmler Verlag.

- COHEN, H. (1883). *Das Prinzip der Infinitesimal-Methode und seine Geschichte*. Berlin: Dümmler Verlag.
- COHEN, H. (1902). *Logik der reinen Erkenntnis*. Berlin: Cassirer Verlag.
- COHEN, H., *et al.* (2000). *Néokantisme et théorie de la connaissance*. (Traduit sous la direction de Marc de Launay). Paris : Vrin.
- COHEN, R. S., SEEGER, R. J. (1970). *Ernst Mach, physicist and philosopher*. Dordrecht: Reidel.
- COQUAND, T. (2018). Type Theory. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/type-theory/>
- CORRY, L. (1993). Kuhnian Issues, Scientific Revolutions and the History of Mathematics. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 24(1), 95-117. [10.1016/0039-3681\(93\)90026-G](https://doi.org/10.1016/0039-3681(93)90026-G)
- CORRY, L. (1997). David Hilbert and the Axiomatization of Physics (1894-1905). *Archive for History of Exact Sciences*, 51, 89-197. [10.1007/BF00375141](https://doi.org/10.1007/BF00375141)
- CRAIG, W. (1953). On axiomatizability within a system. *Journal of Symbolic Logic*, 18(1), 30-32. [10.2307/2266324](https://doi.org/10.2307/2266324)
- CRAIG, W. (1956). Replacement of auxiliary expressions. *Philosophical Review*, 65(1), 38-55. [10.2307/2182187](https://doi.org/10.2307/2182187)
- CRAVER, C. F. (2002). Structures of Scientific Theories. Dans MACHAMER, P. K., SILBERSTEIN, M. (dir.) (2002). *Blackwell Guide to the Philosophy of Science*. Oxford: Blackwell.
- CREATH, R. (2014). Logical Empiricism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/logical-empiricism/>
- CROMBIE, A. C. (1994). *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition*. Londres: Duckworth & Co.
- CROMBIE, A. C. (1995). Commitments and Styles of European Scientific Thinking. *History of Science*, 33(2), 225-238. [10.1177/007327539503300204](https://doi.org/10.1177/007327539503300204)
- CROW, J. F. (1992). Sewall Wright's Place in Twentieth-Century Biology. Dans SARKAR, S. (dir.) (1992). *The Founders of Evolutionary Genetics. A Centenary Reappraisal*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- CROW, J. F. (2007). Sewall Wright. Dans MATTHEN, M., STEPHENS, C. (dir.) (2007). *Philosophy of Biology*. Amsterdam: Elsevier. 1ère édition.

- CROW, J. F., KIMURA, M. (1970). *An Introduction to Population Genetic Theory*. New York, N. Y.: Harper & Row.
- DAHMS, H. J., Versuch einer Charakterisierung des Wiener Kreises. Dans *Philosophie, Wissenschaft, Aufklärung*. Berlin-New York: W. de Gruyter.
- DALLA CHIARA SCABIA, M. L., TORALDO DI FRANCIA, G. (1973). A Logical Analysis of Physical Theories. *La Rivista del Nuovo Cimento*, 3(1), 1-20. [10.1007/BF02788089](https://doi.org/10.1007/BF02788089)
- DARWIN, C. (1839). *The narrative of the voyages of H. M. Ships Adventure and Beagle*. Londres: Colburn.
- DARWIN, C. (1845). *Journal of researches into the natural history and geology of the countries visited during the voyage of H.M.S. Beagle round the world, under the Command of Capt. Fitz Roy*. Londres: John Murray. 2ème édition.
- DARWIN, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: Murray. 1ère édition.
- DARWIN, C. (1860). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: Murray. 2ème édition.
- DARWIN, C. (1861). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: Murray. 3ème édition.
- DARWIN, C. (1866). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: Murray. 4ème édition.
- DARWIN, C. (1868). *The variation of animals and plants under domestication*. Londres: John Murray. 1ère édition.
- DARWIN, C. (1869). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. Londres: Murray. 5ème édition.
- DARWIN, C. (1873). *L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle, ou La lutte pour l'existence dans la nature*. (Traduit par J.-J. Moulinié). Paris : Reinwald.
- DARWIN, C. (1875). *The variation of animals and plants under domestication*. Londres: John Murray. 2ème édition.
- DARWIN, C. (1880). Sir Wyville Thomson and natural selection. *Nature*, 23, 32.
- DARWIN, C. (2003). *Voyage d'un naturaliste autour du monde*. (Traduit par Edmond Barbier). Paris : Éditions La Découverte.

- DARWIN, C. (2013). *L'Origine des espèces*. (Traduit, présenté et annoté par Thierry Hoquet). Paris : Éditions du Seuil.
- DAVENPORT, C. B. (1905). Species and varieties, their origin by mutation. By Hugo de Vries. A review. *Science*, 22, 369-372.
- DAVENPORT, C. B. (1906). The Mutation Theory in Animal Evolution. *Science*, 24, 556-558.
- DAVENPORT, C. B. (1910). The Imperfection of Dominance and Some of Its Consequences. *American Naturalist*, 44(519), 129-135. [10.1086/279124](https://doi.org/10.1086/279124)
- DAVENPORT, C. B. (1912). Light Thrown by the Experimental Study of Heredity Upon the Factors and Methods of Evolution. *American Naturalist*, 46(543), 129-138. [10.1086/279264](https://doi.org/10.1086/279264)
- DAWKINS, R. (1976). *The Selfish Gene*. Oxford: Oxford University Press.
- DAWKINS, R. (1982). *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press.
- DEDEKIND, R. (1872). *Stetigkeit und Irrationale Zahlen*. Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- DEDEKIND, R. (1888). *Was sind und was sollen die Zahlen?* Braunschweig: Vieweg & Sohn.
- DELISLE, R. G. (2009). *Les philosophies du néodarwinisme*. Paris : PUF.
- DEMOPOULOS, W. (2003). On the Rational Reconstruction of our Theoretical Knowledge. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 54(3), 371-403. [10.1093/bjps/54.3.371](https://doi.org/10.1093/bjps/54.3.371)
- DEMOPOULOS, W. (2011). Three Views of Theoretical Knowledge. *British Journal for the Philosophy of Science*, 62(1), 177-205. [10.1093/bjps/axq021](https://doi.org/10.1093/bjps/axq021)
- DEMOPOULOS, W. (2013a). *Logicism and its Philosophical Legacy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- DEMOPOULOS, W. (2013b). Carnap's thesis. Dans DEMOPOULOS, W. (2013a).
- DEMOPOULOS, W. (2013c). Three views of theoretical knowledge Dans DEMOPOULOS, W. (2013a).
- DEMOPOULOS, W. (2013d). On the rational reconstruction of our theoretical knowledge. Dans DEMOPOULOS, W. (2013a).
- DEPEW, D. J. (2009). The rhetoric of Darwin's *Origin of Species*. Dans RUSE, M., RICHARDS, R. (2009) *The Cambridge Companion to The Origin of Species*. Cambridge: Cambridge University Press.

- DEPEW, D. J. (2012). The rhetoric of evolutionary theory. *Biological Theory*, 7(4), 380-389.
[10.1007/s13752-012-0054-2](https://doi.org/10.1007/s13752-012-0054-2)
- DEPEW, D. J. (2013). Conceptual Change and the Rhetoric of Evolutionary Theory: “Force Talk” as a Case Study and Challenge for Science Pedagogy. Dans KAMPOURAKIS, K. (2013). *The Philosophy of Biology. A Companion for Educators*. Suisse: Springer Nature.
- DEPEW, D. J., WEBER, B. H. (dir.) (1985). *Evolution at a Crossroads: The New Biology and Philosophy of Science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- DEPEW, D. J., WEBER, B. H. (1988). Consequences of Nonequilibrium Thermodynamics for Darwinism. Dans WEBER, B. H., DEPEW, D. J., SMITH, J. D. (dir.) (1988). *Entropy, Information, and Evolution: New Perspectives on Physical and Biological Evolution*. Cambridge, MA: MIT Press.
- DE ROUILHAN, P. (1996). *Russell et le cercle des paradoxes*. Paris : PUF.
- DE ROUILHAN, P. (2009). Carnap on logical consequence for languages I and II. Dans WAGNER, P. (dir.) (2009).
- DETLEFSEN, M. (1993a). Hilbert’s formalism. *Revue Internationale de Philosophie*, 47(186), 285-304.
- DETLEFSEN, M. (1993b). The Kantian Character of Hilbert’s Formalism. Dans J. CZERMAK, J. (dir.) (1993). *Philosophie der Mathematik. Akten des 15. Internationalen Wittgenstein Symposiums*. Vienne: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky.
- DETLEFSEN, M. (1990). Brouwerian intuitionism. *Mind*, 99(396), 501-534.
[10.1093/mind/XCIX.396.501](https://doi.org/10.1093/mind/XCIX.396.501)
- DETLEFSEN, M. (1992). Poincaré against the Logicians. *Synthese*, 90(3), 349-378.
[10.1007/BF00500033](https://doi.org/10.1007/BF00500033)
- DETLEFSEN, M. (1996). Philosophy of mathematics in the twentieth century. Dans SHANKER, S. (1996). *Routledge History of Philosophy*. (Volume 9). Londres: Routledge.
- DETLEFSEN, M. (2013). Freedom and Consistency. Dans GOLDBLATT, R., et al. (dir.) (2013). *Proceedings of the 12th Asian Logic Conference*. Singapore: World Scientific.
- DEVLIN, K. J. (2004). *Sets, Functions and Logic. An Intro to Abstract Mathematics*. Boca Raton-Londres-New York-Washington, D.C.: Chapman & Hall. 3ème édition.
- DE VRIES, H. (1889). *Intracellulare Pangenesis*. Jena: Fisher Verlag.

- DE VRIES, H. (1901). *Die Mutationstheorie*. (Volume 1). Leipzig: Veit Verlag.
- DE VRIES, H. (1903). *Die Mutationstheorie*. (Volume 2). Leipzig: Veit Verlag.
- DE VRIES, H. (1906). *Species and Varieties; Their Origin by Mutation*. Chicago-Londres: Open Court & Kegan Paul.
- DIETRICH, M. R., SKIPPER Jr., R. A. (2012). A shifting terrain: a brief history of the adaptive landscape. Dans SVENSSON, E. I., CALSBEEK, R. (2012). *The Adaptive Landscape in Evolutionary Biology*. Oxford: Oxford University Press.
- DOBZHANSKY, T. (1937). *Genetics and the Origin of Species*. New York, N. Y.: Columbia University Press. 1ère édition.
- DOBZHANSKY, T. (1941). *Genetics and the Origin of Species*. New York, N. Y.: Columbia University Press. 2ème édition.
- DOBZHANSKY, T. (1950). Mendelian Populations and their Evolution. *The American Naturalist*, 84(819), 401-418.
- DOBZHANSKY, T. (1951). *Genetics and the Origin of Species*. New York, N. Y.: Columbia University Press. 3ème édition.
- DOBZHANSKY, T. (1955). A review of some fundamental concepts and problems of population genetics. *Symposia on Quantitative Biology*, 20, 1-15.
- DOBZHANSKY, T. (1956). *The Biological Basis of Human Freedom*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- DOBZHANSKY, T. (1964). Biology, molecular and organismic, *American Zoologist*, 4, 443-452.
- DOBZHANSKY, T. (1965). Evolution and transcendence. *Main Currents in Modern Thought*, 22, 3-9.
- DOBZHANSKY, T. (1968). On some fundamental concepts of Darwinian biology. *Evolutionary Biology*, 2, 1-34. 10.1007/978-1-4684-8094-8_1
- DOBZHANSKY, T. (1969). On Cartesian and Darwinian aspects of biology. Dans Morgenbesser S., Suppes P., White M. (dir.) *Philosophy, Science, and Method*. New York, N. Y.: St. Martin's Press.
- DOBZHANSKY, T. (1970). *Genetics of the Evolutionary Process*. New York, N. Y.: Columbia University Press. (4ème édition, largement révisée et modifiée de *Genetics and the Origin of Species*).

- DOBZHANSKY, T. (1973). Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *American Biology Teacher*, 35, 125-129. [10.2307/4444260](https://doi.org/10.2307/4444260)
- DOBZHANSKY, T. (1982). *Genetics and the Origin of Species*. New York, N. Y.: Columbia University Press. Réimpression de la 1ère édition.
- DOBZHANSKY, T., WRIGHT, S. (1941). Genetics of natural populations, V: Relations between mutation rate and accumulation of lethals in populations of *Drosophila Pseudoobscura*. *Genetics*, 26(1), 23-51.
- DOBZHANSKY, T., WRIGHT, S. (1943). Genetics of natural populations, X: Dispersion rate in *Drosophila pseudoobscura*. *Genetics*, 28(4), 304-340.
- DOBZHANSKY, T., WRIGHT, S. (1946). Genetics of natural populations, XII: Experimental reproduction of some of the changes caused by natural selection in certain populations of *Drosophila pseudoobscura*. *Genetics*, 31(2), 125-156.
- DOBZHANSKY, T., WRIGHT, S. (1947). Genetics of natural populations, XV: Rate of diffusion of a mutant gene through a population of *Drosophila pseudoobscura*. *Genetics*, 32(3), 303-324.
- DOBZHANSKY, T., SPASSKY, B. (1963). Genetics of natural populations. XXXIV. Adaptive norm, genetic load and genetic elite in *Drosophila Pseudoobscura*. *Genetics*, 48(11), 1467-1485.
- DOBZHANSKY, T., AYALA, F. (1974). (dir.) *Studies in the Philosophy of Biology*. Los Angeles, CA: University of California Press.
- DOBZHANSKY, T., WRIGHT, S., HOVANITZ, W. (1942). Genetics of natural populations, VII: The allelism of lethals in the third chromosome of *Drosophila pseudoobscura*. *Genetics*, 27(4), 363-394.
- DUBOIS-REYMOND, E. (1872). *Über die Grenzen des Naturerkennens*. Leipzig: Veit Verlag.
- DUCHESNEAU, F. (1997). *Philosophie de la biologie*. Paris : PUF.
- DUFOUR, É. (2000). Notices sur H. Rickert (« Validité logique et validité éthique »), W. Windelband (« Méthode critique ou méthode génétique ? »), E. Cassirer (« Le problème du symbole et sa place dans le système de la philosophie »), P. Natorp (« Logique générale »). Dans COHEN, H., *et al.* (2000).
- DUFOUR, É. (2001). *Hermann Cohen : Introduction au néokantisme de Marbourg*. Paris : PUF.
- DUFOUR, É. (2003). *Les néokantiens: Valeur et vérité*. Paris : Vrin.

- DUHEM, P. (1906). *La Théorie physique. Son objet, sa structure*. Paris : Chevalier & Rivière. 1ère édition.
- DUHEM, P. (2007). *La Théorie physique. Son objet, sa structure*. Paris : Vrin.
- EAST, E. M. (1910). A Mendelian interpretation of variation that is apparently continuous. *American Naturalist*, 44(518), 65-82. [10.1086/279117](https://doi.org/10.1086/279117)
- EAST, E. M. (1916). Inheritance in crosses between *Nicotiana Langsdorffii* and *N. alata*. *Genetics*, 1(4), 311-333.
- EAST, E. M. (1918). The role of reproduction in evolution. *American Naturalist*, 52(618-619), 273-289. [10.1086/279670](https://doi.org/10.1086/279670)
- EDWARDS, A. W. F. (1994). The Fundamental Theorem of Natural Selection. *Biological Review*, 69(4), 443-474. [10.1111/j.1469-185X.1994.tb01247.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1994.tb01247.x)
- EINSTEIN, A. (1921). *Geometrie und Erfahrung*. Berlin: Springer Verlag.
- EISLER, R. (1994). *Kant-Lexikon*. Hildesheim: Olms Verlag.
- ELDREDGE, N. (1985a). *Time Frames: The Rethinking of Darwinian Evolution and the Theory of Punctuated Equilibria*. New York, N. Y.: Simon and Schuster.
- ELDREDGE, N. (1985b). *Unfinished Synthesis: Biological Hierarchies and Modern Evolutionary Thought*. New York-Oxford: Oxford University Press.
- ELDREDGE, N., GOULD, S. J. (1972). Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism. Dans SCHOPF, T. M. J. (dir.) (1972). *Models in Paleobiology*. San Francisco, CA: Freeman.
- ELDREDGE, N., GOULD, S. J. (1977). Punctuated Equilibria: The Tempo and Mode of Evolution Reconsidered. *Paleobiology*, 3(2), 115-151. [10.1017/S0094837300005224](https://doi.org/10.1017/S0094837300005224)
- ENDERTON, H. B. (2001). *A Mathematical Introduction to Logic*. Dordrecht: Springer. 2ème édition.
- EWENS, W. J. (1989). An Interpretation and Proof of the Fundamental Theorem of Natural Selection. *Theoretical Population Biology*, 36(2), 167-80. [10.1016/0040-5809\(89\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0040-5809(89)90028-2)
- FALK, R. (1984). The gene in search of an identity. *Human Genetics*, 68, 195–204.
- FEFERMAN, S. (2005). Predicativity. Dans SHAPIRO, S. (dir.) (2005). *The Oxford Handbook of Philosophy of Mathematics and Logic*. Oxford: Oxford University Press.

- FEIGL, H. (1970). The “orthodox” view of theories: remarks in defense as well as critique. Dans Radner, M., Winokur, S. (dir.) (1970). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. (Volume 4). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- FEUDA, R., *et al.* (2012). Metazoan opsin evolution reveals a simple route to animal vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(46), 18868–18872. [10.1073/pnas.1204609109](https://doi.org/10.1073/pnas.1204609109)
- FEYERABEND, P. (1962). Explanation, reduction and empiricism. Dans FEIGL, H., MAXWELL, G. (1962). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. (Volume 3). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- FEYERABEND, P. (1975). *Against the Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. Londres-New York: New Left Books.
- FEYNMAN, R., LEIGHTON, R., SANDS, M. (1964). *The Feynman Lectures on Physics*. (Volume 1). Boston: Addison-Wesley. 1ère édition.
- FEYNMAN, R., LEIGHTON, R., SANDS, M. (1999). *Le Cours de physique de Feynman*. (Volume 1). (Traduit sous la direction de M. Bloch). Paris : Dunod.
- FILIPCHENKO, I. (1927). *Variabilität und Variation*. Berlin: Borntraeger Verlag.
- FISHER, R. A. (1918). The correlation between relatives on the supposition of Mendelian inheritance. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh*, 53, 399-433. [10.1017/s0080456800012163](https://doi.org/10.1017/s0080456800012163)
- FISHER, R. A. (1922). On the dominance ratio. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 42, 321-41. [10.1016/S0092-8240\(05\)80012-6](https://doi.org/10.1016/S0092-8240(05)80012-6)
- FISHER, R. A. (1927). On Some Objections to Mimicry Theory – Statistical and Genetic. *Transactions of the Royal Entomological Society of London*, 75(2), 269-278. [10.1111/j.1365-2311.1927.tb00074.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1927.tb00074.x).
- FISHER, R. A. (1928). The Possible Modification of the Response of the Wild Type to Recurrent Mutations. *American Naturalist*, 62(679), 115-126. [10.1086/280193](https://doi.org/10.1086/280193)
- FISHER, R. A. (1930). *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford: Oxford University Press.
- FISHER, R. A. (1932). The bearing of genetics on theories of evolution. *Science Progress*, 27, 273-287.

- FISHER, R. A., FORD, E. B. (1926). Variability of Species. *Nature*, 118, 515-516. [10.1038/118515a0](https://doi.org/10.1038/118515a0)
- FLEEMING JENKIN, H. C. (1867). Review of “The origin of species”. *The North British Review*, 46, 277-318.
- FODOR, J. A. (1974). Special sciences. *Synthese*, 28(2), 97-115. [10.1007/bf00485230](https://doi.org/10.1007/bf00485230)
- FOX KELLER, E. (2000). *The Century of the Gene*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- FRAENKEL, A. A. (1922). Zu den Grundlagen der Cantor-Zermeloschen Mengenlehre. *Mathematische Annalen*, 86, 230-237.
- FRAENKEL, A. A. (1927). *Zehn Vorlesungen über die Grundlegung der Mengenlehre*. Leipzig: Teubner Verlag.
- FRAENKEL, A. A., BAR-HILLEL, Y. (1958). *Foundations of Set Theory*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company.
- FRANK, Ph. (1917). Die Bedeutung der physikalischen Erkenntnistheorie Ernst Machs für das Geisteslebens unserer Zeit. *Die Naturwissenschaften*, 5, 65-84.
- FRANK, Ph. (1932). *Das Kausalgesetz und seine Grenzen*. Vienne: Springer Verlag.
- FRANK, Ph. (1941). *Between Physics and Philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- FRANK, Ph. (1949). *Modern Science and its Philosophy*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- FRANK, S. A. (1995). George Price’s Contribution to Evolutionary Genetics. *Journal of Theoretical Biology*, 175(3), 373-388. [10.1006/jtbi.1995.0148](https://doi.org/10.1006/jtbi.1995.0148)
- FRANK, S. A. (1997). The Price Equation, Fisher’s Fundamental Theorem, Kin Selection, and Causal Analysis. *Evolution*, 51(6), 1712–1729. [10.1111/j.1558-5646.1997.tb05096.x](https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1997.tb05096.x)
- FRANK, S. A., SLATKIN, M. (1992). Fisher’s Fundamental Theorem of Natural Selection. *Trends in Ecology and Evolution*, 7, 92-95. [10.1016/0169-5347\(92\)90248-A](https://doi.org/10.1016/0169-5347(92)90248-A)
- FREGE, G. (1879). *Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*. Halle: Louis Nebert.
- FREGE, G. (1884). *Die Grundlagen der Arithmetik: eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*. Hildesheim: Olms Verlag.

- FREGE, G. (1892). Über Sinn und Bedeutung. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 100, 25-50.
- FREGE, G. (1893). *Grundgesetze der Arithmetik*. Jena: Pohle Verlag.
- FREGE, G. (1918). Der Gedanke. Eine Logische Untersuchung. *Beiträge Zur Philosophie des Deutschen Idealismus*, 1, 58-77.
- FREGE, G. (1919). Die Verneinung. Eine Logische Untersuchung. *Beiträge zur Philosophie des deutschen Idealismus*, 1, 143-157.
- FRIEDMAN, M. (1992). Carnap and A Priori Truth. Dans BELL, D., VOSENKUHL, W. (dir.) (1992). *Science and Subjectivity: The Vienna Circle and Twentieth Century Philosophy*. Berlin: Akademie.
- FRIEDMAN, M. (1999). *Reconsidering Logical Positivism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- FRIEDMAN, M. (2001). *Dynamics of Reason*. Stanford, CA: CSLI Publications.
- FRIEDMAN, M. (2006). Overcoming Metaphysics: Carnap and Heidegger. Dans GIÈRE, R. N., RICHARDSON, A. W. (dir.) (1996).
- FRIEDMAN, M. (2009). Tolerance, intuition, and empiricism. Dans WAGNER, P. (dir.) (2009).
- FRIEDMAN, M. (2011). Carnap on Theoretical Terms: Structuralism without Metaphysics. *Synthese*, 180(2), 249-263. 10.1007/s11229-009-9604-y
- FUTUYMA, D. J., KIRKPATRICK, M. (2017). *Evolution*. Sunderland, MA: Sinauer. 4ème édition.
- GABBAY, D. M., et al. (dir.) (2009). *Handbook of the History of Logic*. (Volume 5: Logic from Russell to Church). Dordrecht: Elsevier.
- GABBAY, D. M., et al. (dir.) (2011). *Handbook of the History of Logic*. (Volume 10: Inductive logic). Dordrecht: Elsevier.
- GABBAY, D. M., et al. (dir.) (2012). *Handbook of the History of Logic*. (Volume 6: Sets and Extensions in the Twentieth Century). Dordrecht: Elsevier.
- GALILÉE (1604). Lettre à Paolo Sarpi. Voir GALILÉE (1997). *Dialogues. Lettres choisies*. 'Choix, traduction, préface de Paul-Henri Michel). Paris : Hermann.
- GALILÉE (1632). *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Florence: Landini.

- GALLAVOTTI, G. (1999). *Statistical Mechanics. A Short Treatise*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- GALTON, F. (1898). A Diagram of Heredity. *Nature*, 57, 293. [10.1038/057293a0](https://doi.org/10.1038/057293a0)
- GAYON, J. (1992). *Darwin et l'après-Darwin. Une histoire de l'hypothèse de sélection naturelle*. Paris : Kimé.
- GAYON, J. (1995). La biologie darwinienne de l'évolution est-elle « réductionniste » ? *Revue Philosophique de Louvain*, 93(1-2), 111-139.
- GAYON, J. (2004). De la biologie comme science historique. *Sens public*, 2004/09. <http://www.sens-public.org/articles/32/>
- GAYON, J. (2009a). Philosophy of Biology: An Historico-critical Characterization. Dans BRENNER, A., GAYON, J. (dir.) (2009). *French Studies in the Philosophy of Science. Contemporary Research in France*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- GAYON, J. (2009b). Mort ou persistance du darwinisme ? Regard d'un épistémologue. *Comptes Rendus Palevol*, 8, 321-340. [10.1016/j.crpv.2008.11.004](https://doi.org/10.1016/j.crpv.2008.11.004)
- GAYON, J. (2016). From Mendel to epigenetics: History of genetics. *Comptes Rendus Biologie*, 339 (7-8), 225-230. [10.1016/j.crv.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.crv.2016.05.009)
- HUNEMAN, P. (2014). Formal Darwinism as a tool for understanding the status of organisms in evolutionary biology. *Biology and Philosophy*, 29(2), 271-279. [10.1007/s10539-013-9419-6](https://doi.org/10.1007/s10539-013-9419-6)
- HUNEMAN, P. (2017). Why Would We Call for a New Evolutionary Synthesis? Dans HUNEMAN, P., WALSH, D. (2017). *Challenging the Modern Synthesis: Adaptation, Development, and Inheritance*. Oxford: Oxford University Press.
- GAYON, J., HUNEMAN, P. (2019). The Modern Synthesis: Theoretical or Institutional Event? *Journal of the History of Biology*. [10.1007/s10739-019-09569-2](https://doi.org/10.1007/s10739-019-09569-2)
- GENTZEN, G. (1936). Die Widerspruchsfreiheit der reinen Zahlentheorie. *Mathematische Annalen*, 112, 493-565. [10.1007/BF01565428](https://doi.org/10.1007/BF01565428)
- GIERE, R. N., RICHARDSON, A. W. (dir.) (1996). *Origins of Logical Empiricism*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- GILBERT, S. F. (2000). Genes classical and genes developmental: The different uses of genes in evolutionary syntheses. Dans BUERTON, P., FALK R., RHEINBERGER, H.-J. (dir.) (2000). *The Concept of the gene in development and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.

- GLYMOUR, C. (1980). *Theory and Evidence*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- GÖDEL, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme, I, *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38(1), 173-198. [10.1007/BF01700692](https://doi.org/10.1007/BF01700692)
- GÖDEL, K. (1944). Russell's Mathematical Logic. Dans SCHILPP, P. A. (dir.) (1944). *The Philosophy of Bertrand Russell*. New York, N. Y.: Tudor. 3ème édition.
- GÖDEL, K. (1947). What is Cantor's Continuum Problem? *American Mathematical Monthly*, 54, 515-525. [10.1080/00029890.1947.11991877](https://doi.org/10.1080/00029890.1947.11991877)
- GODFREY-SMITH, P. (1994). A modern history theory of functions. *Noûs*, 28(3), 344-362. [10.2307/2216063](https://doi.org/10.2307/2216063)
- GOLDFARB, W. (1989). Russell's reasons for ramification. Dans SAVAGE, C. W., ANDERSON, C. A. (dir.) (1989). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. (Volume 12). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- GOLDFARB, W. (2009). Carnap's Syntax programme and the philosophy of mathematics. Dans WAGNER, P. (dir.) (2009).
- GOLDSCHMIDT, R. (1929). Experimentelle Mutation und das Problem der sogenannten Parallelinduktion. Versuche an Drosophila. *Biologisches Zentralblatt*, 49, 437-448.
- GOLDSCHMIDT, R. (1933). Some aspects of evolution, *Science*, 78, 539-547. [10.1126/science.78.2033.539](https://doi.org/10.1126/science.78.2033.539)
- GOLDSCHMIDT, R. (1940). *The Material Basis of Evolution*. New Haven, CT: Yale University Press. 1ère édition.
- GOLDSCHMIDT, R. (1960). *The Material Basis of Evolution*. New Jersey: Pageant Books. 2ème édition.
- GOUDGE, T. A. (1961). *The Ascent of Life. A Philosophical Study of the Theory of Evolution*. Londres: Allen & Unwin.
- GOULD, S. J. (1977). *Ontogeny and Phylogeny*. Cambridge, MA: Belknap Press.
- GOULD, S. J. (1980a). G. G. Simpson, Paleontology, and the Modern Synthesis. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1980).
- GOULD, S. J. (1980b). Is a New and General Theory of Evolution Emerging? *Paleobiology*, 6(1), 119-130. [10.1017/S0094837300012549](https://doi.org/10.1017/S0094837300012549)

- GOULD, S. J. (1980c). The Promise of Paleobiology as a Nomothetic Evolutionary Discipline. *Paleobiology*, 6(1), 96-118. [10.1017/S0094837300012537](https://doi.org/10.1017/S0094837300012537)
- GOULD, S. J. (1981). But Not Wright Enough: A Reply to Orzack. *Paleobiology*, 7(1), 128-131. [10.1017/S0094837300003857](https://doi.org/10.1017/S0094837300003857)
- GOULD, S. J. (1982). Darwinism and the Expansion of Evolutionary Theory. *Science*, 216(4544), 380-387. [10.1126/science.7041256](https://doi.org/10.1126/science.7041256)
- GOULD, S. J. (1983). The hardening of the modern synthesis. Dans GRENE, M. (1983). *Dimensions of Darwinism. Themes and Counterthemes in Twentieth-Century Evolutionary Theory*. Paris-Cambridge: Maison des Sciences de l'Homme & Cambridge University Press.
- GOULD, S. J. (1998). G. G. Simpson, Paleontology, and the Modern Synthesis. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998).
- GOULD, S. J. (1992). *The Panda's Thumb. More Reflections in Natural History*. New York-Londres: W. W. Norton & Co. 2ème édition.
- GOULD, S. J. (2002). *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- GOULD, S. J., LEWONTIN, R. C. (1979). The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 205(1161), 581-598. [10.1098/rspb.1979.0086](https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0086)
- GOULD, S. J., ELDREDGE, N. (1982). Introduction. Dans DOBZHANSKY, T. (1982).
- GOULD, S. J., VRBA, E. S. (1982). Exaptation – a Missing Term in the Science of Form. *Paleobiology*, 8(1), 4-15. [10.1017/S0094837300004310](https://doi.org/10.1017/S0094837300004310)
- GRAFEN, A. (2003). Fisher the Evolutionary Biologist. *The Statistician*, 52(3), 319-329. [10.1111/1467-9884.00362](https://doi.org/10.1111/1467-9884.00362)
- GRANT, P. R. (1986). *Ecology and Evolution of Darwin's Finches*. Princeton, N. J.: Princeton University Press. 1ère édition.
- GRANT, P. R., et al. (2006). A developing paradigm for the development of bird beaks. *Biological Journal of the Linnean Society*, 88(1), 17-22. [10.1111/j.1095-8312.2006.00595.x](https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2006.00595.x)
- GRANT, P. R., GRANT, B. R. (2014). *40 Years of Evolution. Darwin's Finches on Daphne Major Island*. Princeton-Oxford: Princeton University Press.
- GRASSÉ, P. P. (1977). *Evolution of living organisms*. New York, N. Y.: Academic Press

- GREGORY, W. K. (1922). On the “Habitus” and “Heritage” of *Cænolestes*. *Journal of Mammalogy*, 3(2), 106-114.
- GRIFFITHS, D. J. (1999). *Introduction to Electrodynamics*. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall. 3ème édition.
- GRIFFITHS, P., STOTZ, K. (2013). *Genetics and philosophy: An introduction*. Cambridge-New York: Cambridge University Press.
- GRIFFITHS, A. J. F., et al. (2000). *Introduction to Genetic Analysis*. Londres: W. H. Freeman & Co. 7ème édition.
- GRIFFITHS, A. J. F., et al. (2015). *Introduction to Genetic Analysis*. W. H. Freeman & Co. 11ème édition.
- HACKING, I. (1990). *The Taming of Chance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HACKING, I. (2014). *Why Is There Philosophy of Mathematics At All?* Cambridge: Cambridge University Press.
- HAECKEL, E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen*. (2 Volumes). Berlin: Reimer Verlag.
- HAECKEL, E. (1868). *Natürliche Schöpfungsgeschichte*. Berlin: Reimer Verlag. 1ère édition.
- HAECKEL, E. (1870). *Natürliche Schöpfungsgeschichte*. Berlin: Reimer Verlag. 2ème édition.
- HALBACH, V. (2010). *The Logic Manual*. Oxford: Oxford University Press.
- HALDANE, J. B. S. (1919a). The probable Errors of Calculated Linkage Values, and the Most Accurate Method of Determining Gametic form Certain Zygotic Series. *Journal of Genetics*, 8(4), 291-297. [10.1007/BF02983270](https://doi.org/10.1007/BF02983270)
- HALDANE, J. B. S. (1919b). The Combination of Linkage Values, and the Calculation of the Distances between the Loci of Linked Factors. *Journal of Genetics*, 8(4), 299-309.
- HALDANE, J. B. S. (1924-1942). A Mathematical Theory of Natural Selection. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*.
- HALDANE, J. B. S. (1929). Natural Selection. *Nature*, 124, 444.
- HALDANE, J. B. S. (1930). A Note on Fisher’s Theory of the Origin of Dominance and on a Correlation between Dominance and Linkage. *American Naturalist*, 64(690), 87-90. [10.1086/280299](https://doi.org/10.1086/280299)

- HALDANE, J. B. S. (1931a). *The Philosophical Basis of Biology*. Londres: Hodder & Stoughton.
- HALDANE, J. B. S. (1931b). A Mathematical Theory of Natural Selection. Part VIII. Metastable Populations. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 27(1), 137-142.
- HALDANE, J. B. S. (1932). *The Causes of Evolution*. Londres-New York: Longmans, Green & Co.
- HALDANE, J. B. S. (1936). Some principles of causal analysis in genetics. *Erkenntnis*, 6, 346-357.
- HALLER, R., STADLER, F. (1988). *Ernst Mach-Werk und Wirkung*. Vienne: Hölder-Pichler-Tempsky.
- HALLETT, M. (2013). Zermelo's Axiomatization of Set Theory. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/zermelo-set-theory/>
- HALVORSON, H. (2012). What Scientific Theories Could Not Be. *Philosophy of Science*, 79(2), 183-206. [10.1086/664745](https://doi.org/10.1086/664745)
- HALVORSON, H. (2013). The Semantic View, if Plausible, is Syntactic. *Philosophy of Science*, 80(3), 475-478. [10.1086/671077](https://doi.org/10.1086/671077)
- HAMILTON, W. D. (1967). Extraordinary Sex Ratios. *Science*, 156(3774), 477-488. [10.1126/science.156.3774.477](https://doi.org/10.1126/science.156.3774.477)
- HANSON, N. R. (1958). *Patterns of Discovery*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HANSON, N. R. (1963). *The Concept of the Positron: A Philosophical Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HARDING, S. (dir.) (1976). *Can Theories Be Refuted? Essays on the Duhem-Quine Thesis*. Dordrecht: Reidel.
- HARDY, G. H. (1908). Mendelian proportions in a mixed population, *Science*, 28, 49-50.
- HEATH, T. (1921). *A History of Greek Mathematics*. (2 Volumes). Oxford: Clarendon Press.
- HEGEL, G. W. F. (1816). *Wissenschaft der Logik*. (Volume 2). Nuremberg: Schrag.
- HEGEL, G. W. F. (2016). *Science de la logique*. (Livre troisième : le concept). (Traduit par Bernard Bourgeois). Paris : Vrin.
- HEMPEL, C. G. (1950a). A note on semantic realism. *Philosophy of science*, 17(2), 169-173. [10.1086/287078](https://doi.org/10.1086/287078)
- HEMPEL, C. G. (1950b). Problems and Changes in the Empiricist Criterion of Meaning. *Revue Internationale de Philosophie*, 41(11), 41-63.

- HEMPEL, C. G. (1951). The Concept of Cognitive Significance: A Reconsideration. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 80(1), 61-77. [10.2307/20023635](https://doi.org/10.2307/20023635)
- HEMPEL, C. G. (1952). *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- HEMPEL, C. G. (1954). A Logical Appraisal of Operationism. *Scientific Monthly*, 79, 215-220.
- HEMPEL, C. G. (1958). The Theoretician's Dilemma. Dans FEIGL, H., SCRIVEN, M., MAXWELL, G. (dir.) (1958). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. (Volume 2). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- HEMPEL, C. G. (1963). Implications of Carnap's Work for the Philosophy of Science. Dans SCHILPP, P. A. (dir.) (1963).
- HEMPEL, C. G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*. New York, N. Y.: Free Press.
- HEMPEL, C. G. (1966). *Philosophy of Natural Science*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- HEMPEL, C. G. (1970). On the "standard conception" of scientific theories. Dans Radner, M., Winokur, S. (dir.) (1970). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. (Volume 4). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- HEMPEL, C. G. (2012). *Éléments d'épistémologie*. (Traduit par Bernard Saint-Sermin). Paris : Armand Colin.
- HEMPEL, C. G., OPPENHEIM, P. (1948). Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, 15(2), 135-175. [10.1086/286983](https://doi.org/10.1086/286983)
- HERRON, J. C., FREEMAN, S. (2014). *Evolutionary Analysis*. Londres: Pearson. 5ème édition.
- HESSE, M. B. (1966). *Models and Analogies in Science*. Notre Dame, IN: University of Notre Dame Press.
- HEYTING, A. (1930). Sur la logique intuitionniste. *Bulletin de l'Académie Royale de Belgique*, 16, 957-963.
- HEYTING, A. (1934). *Mathematische Grundlagenforschung, Intuitionismus, Beweistheorie*. Berlin: Springer Verlag.
- HEYTING, A. (1956). *Intuitionism. An Introduction*. Amsterdam North-Holland.
- HILBERT, D. (1899). Grundlagen der Geometrie. Dans *Festschrift zur Feier der Enthüllung des Gauss-Weber-Denkmal in Göttingen*. Leipzig: Teubner Verlag. 1ère édition.

- HILBERT, D. (1901). Mathematische Probleme. Dans *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-Phys. Klasse*.
- HILBERT, D. (1905). *Mechanik, Ms. Vorlesung WS 1905-06*. Édité par E. Hellinger. Bibliothek des Mathematischen Seminars der Universität Göttingen.
- HILBERT, D. (1916). Die Grundlagen der Physik (Erste Mitteilung). *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen – Mathematisch-Physikalische Klasse 1916*, 395-407.
- HILBERT, D. (1917). Die Grundlagen der Physik (Zweite Mitteilung). *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen – Mathematisch-Physikalische Klasse 1917*, 53-76.
- HILBERT, D. (1918). Axiomatisches Denken. *Mathematische Annalen*, 78, 405-415. [10.1007/BF01457115](https://doi.org/10.1007/BF01457115)
- HILBERT, D. (1922). Neubegründung der Mathematik: Erste Mitteilung. *Abhandlungen aus dem Seminar der Hamburgischen Universität, 1*, 157-177. [10.1007/BF02940589](https://doi.org/10.1007/BF02940589)
- HILBERT, D. (1923). Die logischen Grundlagen der Mathematik. *Mathematische Annalen*, 88, 151-165. [10.1007/BF01448445](https://doi.org/10.1007/BF01448445)
- HILBERT, D. (1926). Über das Unendliche. *Mathematische Annalen*, 95, 161-190. [10.1007/BF01206605](https://doi.org/10.1007/BF01206605)
- HILBERT, D. (1928). Die Grundlagen der Mathematik. *Abhandlungen aus dem mathematischen Seminar der Hamburgischen Universität, 6*, 65-83. [10.1007/BF02940602](https://doi.org/10.1007/BF02940602)
- HILBERT, D. (1931). Die Grundlegung der elementaren Zahlenlehre. *Mathematische Annalen*, 104, 485-494. [10.1007/BF01457953](https://doi.org/10.1007/BF01457953)
- HILBERT, D. (1971). *Les Fondements de la géométrie*. (Traduit par Paul Rossier). Paris : Dunod.
- HILBERT, D., BERNAYS, P. (1934). *Grundlagen der Mathematik*. (Volume 1). Berlin: Springer.
- HINTIKKA, J. (1966). A Two-Dimensional Continuum of Inductive Methods. *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, 43, 113-132. [10.1016/S0049-237X\(08\)71666-5](https://doi.org/10.1016/S0049-237X(08)71666-5)
- HINTIKKA, J. (1975). *Rudolf Carnap, Logical Empiricist: Materials and Perspectives*, Dordrecht: Springer Netherlands.
- HINTIKKA, J., et al. (dir.) (1981). *Theory Change, Ancient Axiomatics, and Galileo's Methodology*. Dordrecht: Reidel.

- HOCQUET, T. (2009). *Darwin contre Darwin. Comment lire l'Origine des espèces ?* Paris : Éditions du Seuil.
- HOSIASSON-LINDEBAUM, J. (1940). On Confirmation. *Journal of Symbolic Logic*, 5, 133-148.
- HULL, D. L. (1969). What Philosophy of Biology Is Not. *Synthese*, 20(2), 157-184. [10.1007/BF00413784](https://doi.org/10.1007/BF00413784)
- HULL, D. L. (1972). Reduction in Genetics – Biology or Philosophy? *Philosophy of Science*, 39, 491-499. [10.1086/288470](https://doi.org/10.1086/288470)
- HULL, D. L. (1973). Reduction in Genetics – Doing the Impossible. Dans SUPPES, P. *et al.* (1973). *Logic, Methodology and Philosophy of Science IV*. Amsterdam: North-Holland.
- HULL, D. L. (1974). *Philosophy of Biological Science*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall.
- HUXLEY, J. (dir.) (1940). *The New Systematics*. Oxford: Clarendon Press.
- HUXLEY, J. (1942). *Evolution: The Modern Synthesis*. Londres: Allen & Unwin.
- HUXLEY, J., HALDANE, J. B. S. (1927). *Animal Biology*. Oxford : Clarendon Press.
- HUXLEY, J., *et al.* (1954). *Evolution as a Process*. Londres: Allen & Unwin.
- HYLTON, P. (1990). *Russell, Idealism, And the Emergence of Analytic Philosophy*. Oxford: Clarendon Press.
- IRVINE, A. D., DEUTSCH, H. (2020). Russell's Paradox. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/russell-paradox/>
- JABLONKA, E., LAMB, M. (2014). *Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life*. Cambridge, MA: MIT Press. 2ème édition.
- JACOB, P. (1980a). *L'Empirisme logique. Ses antécédents, ses critiques*. Paris : Éditions de Minuit.
- JACOB, P. (1980b). *De Vienne à Cambridge. L'héritage du positivisme logique de 1950 à nos jours*. (Essais traduits et présentés par Pierre Jacob). Paris : Gallimard.
- JECH, T. (2006). *Set Theory*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag. 4ème édition.
- JEFFREYS, H. (1939). *Theory of Probability*. Oxford: Clarendon Press. Cambridge: Cambridge University Press.
- JEPSEN, G. L., MAYR, E., SIMPSON, G. G. (dir.) (1949). *Genetics, paleontology, and evolution*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.

- JAYNES, E. T. (2003). *Probability Theory : The Logic of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- JENNINGS, H. S. (1908). The interpretation of the behavior of the lower organisms. *Science*, 27(696), 698-710. [10.1126/science.27.696.698](https://doi.org/10.1126/science.27.696.698)
- JENNINGS, H. S. (1909). Heredity and variation in the simplest organisms. *American Naturalist*, 43(510), 321-337. [10.1086/279063](https://doi.org/10.1086/279063)
- JENNINGS, H. S. (1910). Experimental evidence on the effectiveness of selection. *American Naturalist*, 44(519), 136-145. [10.1086/279125](https://doi.org/10.1086/279125)
- JENNINGS, H. S. (1912). Production of pure homozygotic organisms from heterozygotes by self-fertilization. *American Naturalist*, 46(548), 487-491. [10.1086/279296](https://doi.org/10.1086/279296)
- JENNINGS, H. S. (1914). Formulae for the results of inbreeding. *American Naturalist*, 48(575), 693-696. [10.1086/279440](https://doi.org/10.1086/279440)
- JENNINGS, H. S. (1916). The numerical results of different systems of breeding. *Genetics*, 1(1), 53-89.
- JENNINGS, H. S. (1917). Modifying factors and multiple allelomorphs in relation to the results of selection. *American Naturalist*, 51(605), 301-306. [10.1086/279606](https://doi.org/10.1086/279606)
- JENNINGS, H. S. (1935). *Genetic Variations in Relation to Evolution, A Critical Inquiry Into the Observed Types of Inherited Variation, in Relation to Evolutionary Change*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- JOERGENSEN, J. (1970). *The Development of Logical Empiricism*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- JOHANNSEN, W. (1909). *Elemente der exakten Erblchkeitslehre*. Jena: Fischer Verlag.
- JOHANNSEN, W. (1915). Experimentelle Grundlagen der Deszendenzlehre. Variabilität, Vererbung, Kreuzung, Mutation. *Kultur der Gegenwart*, 3(4), 497-660.
- JOHANNSEN, W. (1923). Some remarks about units in heredity. *Hereditas*, 4(1-2), 133-141. [10.1111/j.1601-5223.1923.tb02952.x](https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1923.tb02952.x)
- JONES, D. F. (1917). Dominance of Link Factors as a Means of Accounting for Heterosis. *Genetics*, 2(5), 466-479.
- JONES, D. F. (1919). Selection of Pseudo-Starchy Endosperm in Maize. *Genetics*, 4(4), 364-393.

- JONES, D. F. (1924). The Attainment of Homozygosity in Inbred Strains of Maize. *Genetics*, 9(5), 405-418.
- JORDAN, D. S. (1895). *The Factors in Organic Evolution*. Palo Alto, CA: Leland Stanford Junior University Press.
- JORDAN, D. S. (1898). *Footnotes to Evolution*. New York, N. Y.: D. Appleton & Co.
- JORDAN, D. S. (1905). The Origin of Species through Isolation. *Science*, 22(566), 545-562. [10.1126/science.22.566.545](https://doi.org/10.1126/science.22.566.545)
- JORDAN, D. S., KELLOG, V. L. (1907). *Evolution and Animal Life*. New York, N. Y.: D. Appleton & Co.
- JORDAN, K. (1896). On mechanical selection and other problems. *Novitates Zoologicae*, 3, 426-525.
- JORDAN, K. (1905). Der Gegensatz zwischen geographischer und nichtgeographischer Variation. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie*, 83, 151-210.
- KAISER, M. I. (2014). L'explication en biologie. Dans MERLIN, F., HOQUET, T. (dir.) (2014). *Précis de philosophie de la biologie*. Paris : Vuibert.
- KANT, I. (1781). *Kritik der reinen Vernunft*. Riga: Hartknoch. 1ère édition.
- KANT, I. (1786). *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*. Riga: Hartknoch.
- KANT, I. (1787). *Kritik der reinen Vernunft*. Riga: Hartknoch. 2ème édition.
- KANT, I. (1980). *Œuvres philosophiques*. (Volume 1). (Traduit et publié sous la direction de Ferdinand Alquié). Paris : Gallimard.
- KEMENY, J. G. (1952). Extension of the methods of inductive logic. *Philosophical Studies*, 3(3), 38 – 42. [10.1007/BF02333166](https://doi.org/10.1007/BF02333166)
- KEYNES, J. M. (1921). *A Treatise on Probability*. Londres: Macmillan.
- KIMURA, M. (1968). Evolutionary rate at the molecular level. *Nature*, 217, 624-626. [10.1038/217624a0](https://doi.org/10.1038/217624a0)
- KIMURA, M. (1983). *The neutral theory of molecular evolution*. Cambridge-New York: Cambridge University Press.
- KING, J. K., JUKES, T. H. (1969). Non-Darwinian evolution. *Science*, 164(3881), 788-798. [10.1126/science.164.3881.788](https://doi.org/10.1126/science.164.3881.788)

- KING, R. C., STANSFIELD, W. D., MULLIGAN, P. K. (dir.) (2006). *A Dictionary of Genetics*. Oxford: Oxford University Press. 7ème édition.
- KITCHER, P. (1982). Genes. *British Journal for the Philosophy of Science*, 33(4), 337-359. [10.1093/bjps/33.4.337](https://doi.org/10.1093/bjps/33.4.337)
- KREMER, M. (2000). Judgment and truth in Frege. *Journal of the History of Philosophy*, 38(4), 549-581. [10.1353/hph.2005.0032](https://doi.org/10.1353/hph.2005.0032)
- KUHN, T. S. (1959). Energy conservation as an example of simultaneous discovery. Dans CLAGETT, M. (dir.). *Critical problems in the history of science*. Madison: University of Wisconsin Press.
- KUHN, T. S. (1970a). Logic of Discovery or Psychology of Research? Dans LAKATOS, I., MUSGRAVE, A. (1970). *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KUHN, T. S. (1970b). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 2ème édition.
- KUHN, T. S. (1977). *The Essential Tension. Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- KUHN, T. S. (1990). *La tension essentielle. Tradition et changement dans les sciences*. (Traduit par Michel Biezunski, Pierre Jacob, Andrée Lyotard-May et Gilbert Voyat). Paris : Gallimard.
- LACK, D. (1945). The Galápagos finches (*Geospizinae*): A study in variation. *Occasional Papers of the California Academy of Science*, 21, 1-159.
- LACK, D. (1947). *Darwin's Finches*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LALAND, K. N., et al. (2014). Does evolutionary theory need a rethink? Yes, urgently. *Nature*, 514(7521), 161-164. [10.1038/514161a](https://doi.org/10.1038/514161a)
- LALAND, K. N., et al. (2015). The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1813). [10.1098/rspb.2015.1019](https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1019)
- LANGE, F. A. (1866). *Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart*. Iserlohn: Baedeker Verlag.
- LARGEAULT, J. (dir.) (1992). *Intuitionnisme et théorie de la démonstration*. Paris : Vrin.

- LAUDAN, L. (1977). *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Los Angeles, CA: University of California Press.
- LAUGIER, S. (dir.) (2001). *Carnap et la construction logique du monde*. Paris : Vrin.
- LE GUYADER, H. (2018). *Classification et évolution*. Paris : Éditions Le Pommier.
- LEITGEB, H. (2011). Logic in general philosophy of science: old things and new things. *Synthese*, 179, 339-350. [10.1007/s11229-010-9776-5](https://doi.org/10.1007/s11229-010-9776-5)
- LEITGEB, H. (2020). Rudolf Carnap. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/carnap/>
- LEONELLI, S. (2009). On the locality of data and claims about phenomena. *Philosophy of Science*, 76(5), 737-749. [10.1086/605804](https://doi.org/10.1086/605804)
- LEONELLI, S. (2012). Classificatory Theory in Data-intensive Science: The Case of Open Biomedical Ontologies. *International Studies in the Philosophy of Science*, 26(1), 47-65. [10.1080/02698595.2012.653119](https://doi.org/10.1080/02698595.2012.653119)
- LEONELLI, S. (2013). Classificatory Theory in Biology. *Biological Theory*, 7(4), 338-345. [10.1007/s13752-012-0049-z](https://doi.org/10.1007/s13752-012-0049-z)
- LESSARD, S. (1997). Fisher's Fundamental Theorem of Natural Selection Revisited. *Theoretical Population Biology*, 52(2), 119-136. [10.1006/tpbi.1997.1324](https://doi.org/10.1006/tpbi.1997.1324)
- LEWONTIN, R. C. (1978). Adaptation. *Scientific American*, 239(3), 212-231.
- LEWONTIN, R. C. (1979). Sociobiology as an adaptationist program. *Behavioral Science*, 24(1), 5-14. [10.1002/bs.3830240103](https://doi.org/10.1002/bs.3830240103)
- LEWONTIN, R. C. (2000). What Do Population Geneticists Know and How Do They Know It ? Dans CREATH, R., MAIENSCHIN, J. (2000). *Biology and Epistemology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEWONTIN, R. C., WHITE, M. J. D. (1960). Interaction Between Inversion Polymorphisms of Two Chromosome Pairs in the Grasshopper, *Moraba scurra*. *Evolution*, 14(1), 116-129. [10.1111/j.1558-5646.1960.tb03061.x](https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1960.tb03061.x)
- LEWONTIN, R. C., et al. (1981). *Dobzhansky's Genetics of Natural Populations*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- LINSKY, B. (1999). *Russell's Metaphysical Logic*. Stanford, CA: CSLI Publications.

- LINSKY, B. (2002). The Resolution of Russell's Paradox in "Principia Mathematica". *Philosophical Perspectives*, 16, 395-417.
- LINSKY, B. (2011). *The Evolution of Principia Mathematica: Bertrand Russell's Manuscripts and Notes for the Second Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LINSKY, B. (2013). Ernst Schroeder and Zermelo's Anticipation of Russell's Paradox. Dans LEPAGE, F., FREDET, K. (dir.) (2013). *La crise des fondements: Quelle crise ?* Montréal: Les Cahiers d'Ithaque.
- LLOYD, E. A. (1984). A Semantic Approach to the Structure of Population Genetics. *Philosophy of Science*, 51, 242-264. [10.1086/289179](https://doi.org/10.1086/289179)
- LLOYD, E. A. (1988). *The Structure and Confirmation of Evolutionary Theory*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- LLOYD, E. A. (2005). Why the Gene Will Not Return. *Philosophy of Science*, 72(2), 287-310. [10.1086/432425](https://doi.org/10.1086/432425)
- LUTZ, S. (2012). On a Straw Man in the Philosophy of Science – A Defense of the Received View. *Hopos: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, 2(1), 77-120. [10.1086/664460](https://doi.org/10.1086/664460)
- LUTZ, S. (2014). What's Right with a Syntactic Approach to Theories and Models? *Erkenntnis*, 79, 1475-1492. [10.1007/s10670-013-9578-5](https://doi.org/10.1007/s10670-013-9578-5)
- LYNCH, M. (2007). *The Origins of Genome Architecture*. Oxford: Oxford University Press.
- MACH, E. (1883). *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. Leipzig: Brockhaus Verlag.
- MACH, E. (1886). *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*. Jena: Fischer Verlag.
- MACH, E. (1904). *La Mécanique. Exposé historique et critique de son développement*. (Traduit par Émile Bertrand). Paris : Hermann.
- MACH, E. (1905). *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*. Leipzig: Barth Verlag.
- MACHAMER, P. K., TURNBULL, R. G. (1976). *Motion and time, space and matter: interrelations in the history of philosophy and science*. Columbus: Ohio State University Press.

- MACHARTHUR, R. H. (1965). Ecological consequences of natural selection. Dans WATERMAN, T., MOROWITZ, H. (1965). *Theoretical and Mathematical Biology*. New York, N. Y.: Blaisdell.
- MADDY, P. (2007). *Second Philosophy: A Naturalistic Method*. Oxford: Clarendon Press.
- MANCOSU, P. (dir.) (1998). *From Brouwer to Hilbert. The Debate on the Foundations of Mathematics in the 1920s*. Oxford-New York: Oxford University Press.
- MANCOSU, P. (2001). Mathematical Explanation: Problems and Prospects. *Topoi*, 20, 97-117.
- MANCOSU, P. (2008). Harvard 1940-1941: Tarski, Carnap, Quine et la question d'un langage mathématique finitiste pour la science. Dans BOUVERESSE, J., WAGNER, P. (dir.) (2008).
- MANCOSU, P. (2010). *The Adventure of Reason*. Oxford: Oxford University Press.
- MARES, E. (2007). The Fact Semantics for Ramified Type Theory and the Axiom of Reducibility. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 48, 237-251.
- MAYR, E. (1942). *Systematics and the Origin of Species*. New York, N. Y.: Columbia University Press
- MAYR, E. (1955). Karl Jordan's contribution to current concepts in systematics and evolution. *Transactions of the Royal Entomological Society of London*, 107(1-14), 45-66. [10.1111/j.1365-2311.1955.tb00462.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.1955.tb00462.x)
- MAYR, E. (1957). Species concepts and definitions. *The Species Problem. American Association for the Advancement of Science Publication*, 50, 1-22.
- MAYR, E. (1959). Where are we? *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 24, 1-14. 10.1101/SQB.1959.024.01.003
- MAYR, E. (1961). Cause and effect in biology, *Science*, 134, 1501-1506.
- MAYR, E. (1963). *Animal Species and Evolution*. Cambridge, MA: Belknap Press.
- MAYR, E. (1967). Evolutionary challenges to the mathematical interpretation of evolution. Dans MOORHEAD, P.S., KAPLAN, M. M. (dir.) (1967). *Mathematical Challenges to the Neo-Darwinian Interpretation of Evolution, Ornithological Monographs*, 58, 47-58.
- MAYR, E. (1975). *Evolution and the Diversity of Life*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- MAYR, E. (1980a). Prologue: Some Thoughts on the History of the Evolutionary Synthesis. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1980).

- MAYR, E. (1980b). The Role of Systematics in the Evolutionary Synthesis. MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1980).
- MAYR, E. (1982). *The Growth of Biological Thought*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MAYR, E. (1985). How biology differs from the physical sciences. Dans Depew, D. J., Weber, B. H. (dir.) *Evolution at a Crossroads : The New Biology and the New Philosophy of Science*. Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- MAYR, E. (1993). What was the evolutionary synthesis? *Trends in Ecology and Evolution*, 8, 31-34.
- MAYR, E. (1995). Darwin's impact on modern thought. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 139, 317-325.
- MAYR, E. (1998a). Prologue: Some Thoughts on the History of the Evolutionary Synthesis. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998).
- MAYR, E. (1998b). The Role of Systematics in the Evolutionary Synthesis. MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998).
- MAYR, E. (1998c). Preface, 1998. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998).
- MAYR, E. (2004). *What makes Biology unique ? Considerations on the Autonomy of a Scientific Discipline*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MAYR, E. (2006). Typological versus Population Thinking. Dans SOBER, E. (dir.) (2006). *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*. Cambridge, MA : MIT Press. 3ème édition.
- MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1980). *The Evolutionary Synthesis: Perspectives on the Unification of Biology*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 1ère édition.
- MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998). *The Evolutionary Synthesis: Perspectives on the Unification of Biology*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 2ème édition.
- MENDEL, G. (1866). Versuche über Pflanzenhybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, 4, 3-47.
- MILL, J. S. (1843). *A system of logic*. Londres: Parker.
- MORAN, P. A. P. (1962). *The Statistical Processes of Evolutionary Theory*. Oxford: Clarendon Press.
- MORAN, P. A. P. (1964). On the Nonexistence of Adaptive Topographies. *Annals of Human Genetics*, 27(4), 383-393. [10.1111/j.1469-1809.1963.tb01535.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1963.tb01535.x)

- MORANGE, M. (2016). *Une histoire de la biologie*. Paris : Points.
- MORGAN, T. H. (1903). *Evolution and Adaptation*. New York, N. Y.: Macmillan.
- MORGAN, T. H., *et al.* (1915). *The Mechanism of Mendelian Heredity*. New York, N. Y.: Henry Holt.
- MORGAN, T. H. (1916). *A Critique of the Theory of Evolution*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- MORGAN, T. H. (1923). The bearing of Mendelism on the origin of species. *Scientific Monthly*, 16, 237-247.
- MORGAN, T. H. (1932). *The Scientific Basis of Evolution*. New York, N. Y.: W. W. Norton.
- MORMANN, T. (2007). The Structure of Scientific Theories in Logical Empiricism. Dans RICHARDSON, A., UEBEL, T. (2007). *The Cambridge Companion to Logical Empiricism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- MORRISON, M. (2007). The Development of Population Genetics. Dans MATTHEN, M., STEPHENS, C. (dir.) (2007). *Philosophy of Biology*. Amsterdam: Elsevier. 1ère édition.
- MORSCHER, E. (2018). Bernard Bolzano. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/bolzano/>
- MORTON, E. S., *et al.* (1978). On bluebird “responses to apparent female adultery”. *American Naturalist*, 112(987), 968-971. [10.1086/283340](https://doi.org/10.1086/283340)
- MOSS, L. (2003). One, two (too?), many genes? *The Quarterly Review of Biology*, 78, 57–67. [10.1086/367581](https://doi.org/10.1086/367581).
- MOULINES, C. U. (1976). Approximate Application of Empirical Theories: A General Explication. *Erkenntnis*, 10(2), 201-227. [10.1007/BF00204970](https://doi.org/10.1007/BF00204970)
- MOULINES, C. U. (2001). La (re)construction formelle de l’expérience. Carnap et Nicod. Dans LAUGIER, S. (dir.) (2001).
- MOULINES, C. U. (2002). Introduction: Structuralism as a Program for Modelling Theoretical Science. *Synthese*, 130(1), 1-11. [10.1023/A:1013892808077](https://doi.org/10.1023/A:1013892808077)
- MULLER, H. J. (1948). Evidence of the precision of genetic adaptation. *Harvey Lecture Series*, 43, 165-229.
- MUNK, R. (dir.) (2005). *Hermann Cohen’s Critical Idealism*. Dordrecht: Springer.

- MYHILL, J. (1974). The Undefinability of the Set of Natural Numbers in the Ramified Principia. Dans NAKHNIKIAN, G. (dir.) (1974). *Bertrand Russell's Philosophy*. Londres: Duckworth.
- NAGEL, E. (1950). Science and semantic realism. *Philosophy of Science*, 17(2), 174-181. [10.1086/287079](https://doi.org/10.1086/287079)
- NAGEL, E. (1961). *The Structure of Science : Problems in the Logic of Scientific Explanation*. Londres: Routledge & Kegan Paul.
- NAGEL, E. (1977). *Teleology Revisited and Other Essays in the Philosophy and History of Science*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- NAGEL, E., NEWMAN, J. R. (1958). *Gödel's Proof*. New York, N. Y.: New York University Press.
- NAGEL, E. *et al.* (1989). *Le théorème de Gödel*. Paris : Éditions du Seuil.
- NAGEL, T. (1998). Reductionism and antireductionism. Dans BOCK, G. R., GOODE, J. A. (dir.) (1998). *The Limits of Reductionism in Biology*. Chichester: John Wiley & Sons.
- NATORP, P. (1910). *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Leipzig-Berlin: Teubner Verlag.
- NATORP, P. (1912). *Die allgemeine Psychologie nach kritischer Methode*. Tübingen: Mohr Verlag.
- NEEDHAM, J. (1928a). Organicism in Biology. *Journal of Philosophical Studies*, 3(9), 29-40.
- NEEDHAM, J. (1928b). Recent Developments in the Philosophy of Biology. *Quarterly Review of Biology*, 3(1), 77-91. [10.1086/394294](https://doi.org/10.1086/394294)
- NEEDHAM, J. (1930). Philosophy and Embryology: Prolegomena to a Quantitative Science of Development. *The Monist*, 40(2), 193-210; 40(3), 339-362. [10.5840/monist193040241](https://doi.org/10.5840/monist193040241); [10.5840/monist193040315](https://doi.org/10.5840/monist193040315)
- NELSON, D. L., COX, M. M. (2008). *Lehninger Principles of Biochemistry*. New York, N. Y.: Palgrave Macmillan. 5ème édition.
- NETZ, R. (1999). *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics. A Study in Cognitive History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- NEURATH, O. (1915). Zur Klassifikation von Hypothesensystemen (mit besonderer Berücksichtigung der Optik). *Jahrbuch der Philosophischen Gesellschaft an der Universität zu Wien*. 39-63.
- NEURATH, O. (1932). Protokollsätze. *Erkenntnis*, 3, 204-214. [10.1007/BF01886420](https://doi.org/10.1007/BF01886420)

- NEWTON, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londres: Streater.
- NICHOLSON, D. J., GAWNE, R. (2014). Rethinking Woodger's Legacy in the Philosophy of Biology. *Journal of the History of Biology*, 47(2), 243-292. [10.1007/s10739-013-9364-x](https://doi.org/10.1007/s10739-013-9364-x)
- NICHOLSON, D. J., GAWNE, R. (2015). Neither logical empiricism nor vitalism, but organicism: what the philosophy of biology was. *History and Philosophy of the Life Sciences*, 37(4), 345-381. [10.1007/s40656-015-0085-7](https://doi.org/10.1007/s40656-015-0085-7)
- NILSSON, D.-E. (2009). The evolution of eyes and visually guided behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1531), 2833-2847. [10.1098/rstb.2009.0083](https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0083)
- NILSSON, D.-E. (2013). Eye evolution and its functional basis. *Visual Neuroscience*, 30(1-2), 5-20. [10.1017/S0952523813000035](https://doi.org/10.1017/S0952523813000035)
- NILSSON-EHLE, N. H. (1908). Einige Ergebnisse von Kreuzungen bei Hafer und Weizen. *Botaniska Notiser*, 257-294
- NILSSON-EHLE, N. H. (1909). Kreuzungsuntersuchungen an Hafer und Weizen I. *Lunds Universitets Årsskrift n.f., avd. 2*, 5(2), 1-122.
- NILSSON-EHLE, N. H. (1911a). Kreuzungsuntersuchungen an Hafer und Weizen II. *Lunds Universitets Årsskrift n.f., avd. 2*, 7(6), 1-83.
- NILSSON-EHLE, N. H. (1911b). Nilsson-Ehle, Herman. 1911. Mendélisme et acclimatation. Dans VILMORIN, P. (dir.) (1911). *IVe Conférence internationale de génétique, Paris 1911. Comptes rendus et rapports*. Paris : Vrin.
- NOBLE, G. K., JAEKLE, M. E. (1928). The digital pads of the tree frogs. A study of the phylogenesis of an adaptive structure. *Journal of Morphology*, 45(1), 259-292. [10.1002/jmor.1050450109](https://doi.org/10.1002/jmor.1050450109)
- NYHART, L. K. (2009). *Modern Nature: The Rise of the Biological Perspective in Germany*. Chicago-Londres: University of Chicago Press.
- OBERDAN, T. (1993). *Protocols, Truth and Convention*. Studien zur Oesterreichischen Philosophie. (Volume 19). Amsterdam-Atlanta: Rodopi.
- OBERDAN, T. (1996). Postscript to Protocols: Reflections on Empiricism. Dans GIÈRE, R. N., RICHARDSON, A. W. (dir.) (1996).
- OKASHA, S. (2008). Fisher's Fundamental Theorem of Natural Selection – A Philosophical Analysis. *British Journal for the Philosophy of Science*, 59(3), 319-351. [10.1093/bjps/axn010](https://doi.org/10.1093/bjps/axn010)

- ORGOGOZO, V., PELUFFO, A. E., MORIZOT, B. (2016). The “Mendelian Gene” and the “Molecular Gene”: Two Relevant Concepts of Genetic Units. Dans ORGOZOGO, V. (2016). *Genes and Evolution*. Amsterdam: Elsevier.
- ORIAN, G. H., PEARSON, N. E. (1979). On the theory of central place foraging. Dans HORN, D. J., MITCHELL, R. D., STAIRS, G. R. (dir.) (1979). *Analysis of Ecological Systems*. Columbus, OH: Ohio University Press.
- ORZACK, S. H. (1981). The Modern Synthesis is Partly Wright, *Paleobiology*, 7(1), 131-134. [10.1017/S0094837300003845](https://doi.org/10.1017/S0094837300003845)
- ORZACK, S. H. (2010). Adaptationism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/adaptationism/>
- ORZACK, S. H., SOBER, E. (1994). Optimality Models and the Test of Adaptationism. *The American Naturalist*, 143(3), 361-380. [10.1086/285608](https://doi.org/10.1086/285608)
- OSBORN, H. F. (1893). *Present Problems in Evolution and Heredity*. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office.
- OSBORN, H. F. (1894). *Columbia University Biological Series: Vol. 1. From the Greeks to Darwin: An Outline of the Development of the Evolution Idea*. New York, N. Y.: Macmillan & Co.
- OSBORN, H. F. (1895). The Hereditary Mechanism and the Search for the Unknown Factors of Evolution. *The American Naturalist*, 29(341), 418-439. [10.1086/276152](https://doi.org/10.1086/276152)
- OSBORN, H. F. (1917). *The Origin and Evolution of Life*. New York, N. Y.: Charles Scribner’s Sons.
- OSBORN, H. F. (1927). *Man rises to Parnassus; critical epochs in the pre-history of man*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- OSBORN, H. F. (1934). *Aristogenesis, the Creative Principle in the Origin of Species*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- OSGOOD, W. H. (1909). *Revision of the mice of the American genus Peromyscus*. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office.
- OUELBANI, M. (2006). *Le cercle de Vienne*. Paris : PUF.
- PACKARD JR., A. S. (1901). *Lamarck, the Founder of Evolution: His Life and Work*. New York, N. Y.: Longmans, Green & Co.
- PARKER, G. A., SMITH, J. M. (1990). Optimality theory in evolutionary biology. *Nature*, 348, 27-33. [10.1038/348027a0](https://doi.org/10.1038/348027a0)

- PARSONS, C. (1998). Finitism and Intuitive Knowledge. Dans SCHIRN, M (dir.) (1998). *The Philosophy of Mathematics Today*. Oxford: Oxford University Press.
- PARSONS, C. (2007). *Mathematical Thought and its Objects*. Cambridge: Cambridge University Press.
- PASCH, M. (1882). *Vorlesungen über neuere Geometrie*. Leipzig-Berlin: Teubner Verlag.
- PAULING, L. *et al.* (1949). Sickle Cell Anemia, a Molecular Disease. *Science*, 110(2865), 543-548.
10.1126/science.110.2865.543
- PAYNE, F. (1909). Some New Types of Chromosome Distribution and Their Relation to Sex. *Biological Bulletin*, 16(3), 119-166. [10.2307/1536127](https://doi.org/10.2307/1536127)
- PAYNE, F. (1918a). The effect of artificial selection on bristle number in *Drosophila ampelophila* and its interpretation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 4(3), 55-58.
[10.1073/pnas.4.3.55](https://doi.org/10.1073/pnas.4.3.55)
- PAYNE, F. (1918b). An experiment to test the nature of the variations on which selection acts. *University of Indiana Studies*, 5, 1-45.
- PAYNE, F. (1920). Selection for high and low bristle number in the mutant strain “reduced”. *Genetics*, 5(6), 501-542.
- PAYNE, J. L., WAGNER, A. (2019). The causes of evolvability and their evolution. *Nature Reviews. Genetics*, 20(1), 24-38. [10.1038/s41576-018-0069-z](https://doi.org/10.1038/s41576-018-0069-z)
- PEANO, G. (1889). *Arithmetices principia, novo methodo exposita*. Turin: Bocca.
- PEARSON, K. (1900). On the criterion that a given system of deviations from the probable in the case of a correlated system of variables is such that it can be reasonably supposed to have arisen from random sampling. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 50(302), 157-175. [10.1080/14786440009463897](https://doi.org/10.1080/14786440009463897)
- PEIRCE, C. S. (1933). *Collected papers*. (Édités par C. Hartshorne et P. Weiss). Cambridge MA: Harvard University Press.
- PELLEGRIN, P. (2014). *Aristote: Oeuvres complètes*. Paris : Flammarion.
- PERUTZ, M. F., MITCHISON, J. M. (1950). State of Hæmoglobin in Sickle-Cell Anæmia. *Nature*, 166, 677-679. [10.1038/166677a0](https://doi.org/10.1038/166677a0)
- PIGLIUCCI, M. (2013). On the Different Ways of ‘Doing theory in biology’. *Biological Theory*, 7(4), 287-297. [10.1007/s13752-012-0047-1](https://doi.org/10.1007/s13752-012-0047-1)

- PLACHETZKI, D. C., *et al.* (2007). The origins of novel protein interactions during animal opsin evolution. *PLoS One*, 2(10), e1054. [10.1371/journal.pone.0001054](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001054)
- PLUTYNSKI, A. (2004). Explanation in Classical Population Genetics. *Philosophy of Science*, 71(5), 1201-1214. [10.1086/426773](https://doi.org/10.1086/426773)
- PLUTYNSKI, A. (2006). What was Fisher's fundamental theorem of natural selection and what was it for? *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 37(1), 59-82. [10.1016/j.shpsc.2005.12.004](https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2005.12.004)
- POINCARÉ, H. (1902). *La Science et l'hypothèse*. Paris : Flammarion. 1ère édition.
- POINCARÉ, H. (1905). *La Valeur de la science*. Paris : Flammarion.
- POINCARÉ, H. (1906). Les mathématiques et la logique. *Revue de métaphysique et de morale*, 14, 17-34, 294-317.
- POINCARÉ, H. (2014). *La Science et l'hypothèse*. Paris : Flammarion.
- POJMAN, P. (2019). Ernst Mach. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/ernst-mach/>
- POMA, A. (1997). *The Critical Philosophy of Hermann Cohen*. (Traduit par John Denton). Albany: SUNY Press.
- POPPER, K. (1959). *The Logic of Scientific Discovery*. Londres: Hutchinson.
- POPPER, K. (1963). The Demarcation between Science and Metaphysics. Dans SCHILPP, P. A. (dir.) (1963).
- POPPER, K. (1973). *La Logique de la découverte scientifique*. (Traduit par Philippe Devaux). Paris : Payot.
- POPPER, K. (1979). *Objective Knowledge. An Evolutionary Approach*. Oxford: Clarendon Press. 1ère édition révisée.
- POPPER, K. (1998). *La Connaissance objective: une approche évolutionniste*. Paris : Flammarion.
- PORTER M.L., *et al.* (2011). Shedding new light on opsin evolution. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 279(1726), 3-14. [10.1098/rspb.2011.1819](https://doi.org/10.1098/rspb.2011.1819)
- POULTON, E. B. (1896). *Charles Darwin and the Theory of Natural Selection*. Londres-Paris-Melbourne: Cassell & Co.

- POULTON, E. B. (1904). What is a species? *Proceedings of the Entomological Society of London*, 1903, 77-96.
- POULTON, E. B. (dir.) (1908). *Essays on Evolution. 1889-1907*. Oxford: Clarendon Press.
- POULTON, E. B. (1909). *Charles Darwin and the Origin of Species. Addresses, etc., in America and England in the Year of the Two Anniversaries*. Londres-New York-Bombay-Calcutta: Longmans, Green & Co.
- PRADEU, T. (2015). Toolbox murders: Putting genes in their epigenetic and ecological contexts. *Biology and Philosophy*, 31, 125–142. [10.1007/s10539-014-9471-x](https://doi.org/10.1007/s10539-014-9471-x)
- PRICE, G. R. (1972). Fisher's "Fundamental Theorem" Made Clear. *Annals of Human Genetics*, 36(2), 129-140. [10.1111/j.1469-1809.1972.tb00764.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1972.tb00764.x)
- PRICE, T. D., GRANT, P. R. (1985). The evolution of ontogeny in Darwin's finches: a quantitative genetics approach. *The American Naturalist*, 125(2), 169-188. [10.1086/284336](https://doi.org/10.1086/284336)
- PROVINE, W. B. (1971). *The Origins of Theoretical Population Genetics*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 1ère édition.
- PROVINE, W. B. (1977). Role of Mathematical Population Geneticists in the Evolutionary Synthesis of the 1930's and 40's. Dans Solomon, D. L., Walter, C. (1977). *Mathematical Models in Biological Discovery*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- PROVINE, W. B. (1980). Epilogue. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1980).
- PROVINE, W. B. (1986). *Sewall Wright and Evolutionary Genetics*. Chicago, IL : University of Chicago Press.
- PROVINE, W. B. (1989). Progress in Evolution and Meaning in Life. Dans NITECKI, M. H. (dir.) (1989). *Evolutionary Progress*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- PROVINE, W. B. (1998). Epilogue. Dans MAYR, E., PROVINE, W. B. (dir.) (1998).
- PROVINE, W. B. (2001). *The Origins of Theoretical Population Genetics*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 2ème édition.
- PRZELEWSKI, M. (1969). *The Logic of Empirical Theories*. Londres: Routledge & Kegan Paul.
- PSILLOS, S. (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. London: Routledge.
- PSILLOS, S., CARNAP, R. (2000). Theoretical Concepts in Science. Texte inédit, publié par Stathis Psillos dans PSILLOS, S. (2000). Rudolf Carnap's "Theoretical Concepts in Science". *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 31(1), 151-172. doi:10.1016/S0039-3681(99)00031-X

- PUTNAM, H. (1962). What Theories Are Not. Dans NAGEL, E., SUPPES, P., TARSKI, A. (dir.) (1962). *Logic, Methodology, and Philosophy of Science: Proceedings of the 1960 International Congress*. Stanford, CA: Stanford University Press.
- QUETELET, A. (1835). *Étude sur l'homme et le développement de ses facultés, ou Essai de physique sociale*. (2 Volumes). Paris : Bachelier.
- QUETELET, A. (1848). *Du système social et des lois qui le régissent*. Paris : Guillaumin & Co.
- QUINE, W. V. O. (1939). A Logistical Approach to the Ontological Problem. *Erkenntnis*, 9, 84-89. [10.2307/2268739](https://doi.org/10.2307/2268739)
- QUINE, W. V. O. (1943). Notes on Existence and Necessity. *Journal of Philosophy*, 40(5), 113-127. [10.2307/2017458](https://doi.org/10.2307/2017458)
- QUINE, W. V. O. (1947). On Universals. *Journal of Symbolic Logic*, 12(3), 74-84. [10.2307/2267212](https://doi.org/10.2307/2267212)
- QUINE, W. V. O. (1951). Two Dogmas of Empiricism. *The Philosophical Review*, 60(1), 20-43. [10.2307/2181906](https://doi.org/10.2307/2181906)
- QUINE, W. V. O. (1953). *From a Logical Point of View*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- QUINE, W. V. O. (1957). The scope and language of science. *British Journal for the Philosophy of Science*, 8, 1-17. [10.1093/bjps/VIII.29.1](https://doi.org/10.1093/bjps/VIII.29.1)
- QUINE, W. V. O. (1960). *Word and Object*. Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- QUINE, W. V. O. (1977). *Le Mot et la chose*. Paris: Flammarion.
- RAATIKAINEN, P. (2020). Gödel's Incompleteness Theorems. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/goedel-incompleteness/>
- RACE, R. R., SANGER, R. (1954). *Blood Groups in Man*. Oxford: Blackwell Publishing.
- RAMSEY, F. (1925). The Foundations of Mathematics. Dans RAMSEY (1931).
- RAMSEY, F. (1926). Mathematical Logic. Dans RAMSEY (1931).
- RAMSEY, F. (1929). Theories. Dans RAMSEY (1931).
- RAMSEY, F. (1931). *Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*. (Textes édités par R.B. Braithwaite). Londres: Kegan Paul.
- RAMSEY, F. (2003). *Logique, philosophie et probabilité*. (Traduit sous la direction de Pascal Engel et Mathieu Marion). Paris : Vrin.

- REICHENBACH, H. (1935). Über Induktion und Wahrscheinlichkeit. *Erkenntnis*, 5(1), 267-284. [10.1007/BF00172315](https://doi.org/10.1007/BF00172315)
- REICHENBACH, H. (1938). *Experience and Prediction. An Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- REICHENBACH, H. (1951). *The Rise of Scientific Philosophy*. Berkeley: University of California Press.
- REID, R. G. B. (1985). *Evolutionary Theory: The Unfinished Synthesis*. Ithaca: Cornell University Press.
- REMANE, A. (1971). *Die Grundlagen des natürlichen Systems der vergleichenden Anatomie und der Phylogenetik*. Königstein-Taunus: Koeltz Verlag.
- RENSCH, B. (1929). *Das Prinzip geographischer Rassenkreise und das Problem der Artbildung*. Berlin: Borntraeger Verlag.
- RENSCH, B. (1933). Zoologische Systematik und Artbildungsproblem. *Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft, 1933*, 19-83.
- RENSCH, B. (1939). Typen der Artbildung. *Biological Reviews*, 14(2), 180-222. [10.1111/j.1469-185X.1939.tb00930.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1939.tb00930.x)
- RENSCH, B. (1943). Die paläontologischen Evolutionsregeln. *Zoologischer Betrachtung. Biologia generalis*, 17, 1-55.
- RENSCH, B. (1947). *Neuere Probleme der Abstammungslehre*. Stuttgart: Enke Verlag.
- RENSCH, B. (1959). *Evolution above the Species Level*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- RESCORLA, M. (2019). Convention. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/convention/>
- REY, A. (1907). *La Théorie de la physique chez les physiciens contemporains*. Paris : Félix Alcan.
- REZNICK, D. N. (2010). *The Origin then and now: An interpretative guide to the Origin of Species*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- RHEINBERGER, H.-J. (2007). *Historische Epistemologie zur Einführung*. Hambourg: Junius Verlag.
- RHEINBERGER, H.-J. (2014). *Introduction à la philosophie des sciences*. (Traduit par Nathalie Jas). Paris : La Découverte.

- RHEINBERGER, H.-J., MÜLLER-WILLE, S. (2017). *The Gene. From Genetics to Postgenomics*. (Traduit de l'allemand par Adam Bostanci). Chicago, IL: University of Chicago Press.
- RICE, S. H. (2004). *Evolutionary Theory. Mathematical and Conceptual Foundations*. Oxford: Oxford University Press.
- RICHARD, M. (1998). Quantifiers, substitutional and objectual. *Routledge Encyclopedia of Philosophy*. <https://www.rep.routledge.com/articles/thematic/quantifiers-substitutional-and-objectual/v-1>
- RICKERT, H. (1899). *Kulturwissenschaft und Naturwissenschaft*. Freiburg: Mohr Verlag.
- RICKETTS, T. (1985). Frege, the *Tractatus*, and the Logocentric Predicament. *Noûs*, 19, 3–14.
- RICKETTS, T. (1986a). Objectivity and Objecthood: Frege's Metaphysics of Judgment. Dans HAAPARANTA, L., HINTIKKA, J. (1986). *Frege Synthesized*. Dordrecht: Reidel.
- RICKETTS, T. (1986b). Generality, Meaning, and Sense in Frege. *Pacific Philosophical Quarterly*, 67, 172-195.
- RICKETTS, T. (1996). Carnap: From Syntax to Semantics. Dans GIÈRE, R. N., RICHARDSON, A. W. (dir.) (1996).
- RIEDL, R. (1977). A systems-analytical approach to macro-evolutionary phenomena. *The Quarterly Review of Biology*, 52(4), 351-370. [10.1086/410123](https://doi.org/10.1086/410123)
- RIEPPPEL, O. (2016). *Phylogenetic Systematics*. Boca Raton-Londres-New York: CRC Press.
- ROGER, J. (1989). *Buffon, un philosophe au jardin du roi*. Paris : Fayard.
- ROGER, J. (1995). *Pour une histoire des sciences à part entière*. (Textes établis et présentés par Claude Blanckaert). Paris : Albin Michel.
- ROSENBERG, A. (1985). *The Structure of Biological Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ROSENBERG, A. (2000). *Darwinism in Philosophy, Social Science and Policy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ROSENBERG, A. (2006). *Darwinian Reductionism or How to Stop Worrying and Love Molecular Biology*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- ROSENBERG, A. (2007). Reductionism in Biology. Dans SAHOTRA, S., PLUTYNSKI, A. (2007). *A Companion to the Philosophy of Biology*. Hoboken, N. J.: Blackwell Publishing.

- RUSE, M. (1973). *The Philosophy of Biology*. Londres: Hutchinson.
- RUSE, M. (1974). Reduction in Genetics. Dans COHEN, R. S., *et al.* (dir.) (1974). *PSA 1974*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- RUSE, M. (2000). Booknotes 15.3. *Biology and Philosophy*, 15, 465-473. [10.1023/A:1006710605938](https://doi.org/10.1023/A:1006710605938)
- RUSE, M. (2009). The Darwinian revolution: Rethinking its meaning and significance. *PNAS*, 106(1), 10040-10047. [10.1073/pnas.0901011106](https://doi.org/10.1073/pnas.0901011106)
- RUSSELL, B. (1903). *The Principles of Mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- RUSSELL, B. (1905). On Denoting. *Mind*, 14, 479-493.
- RUSSELL, B. (1906). On Some Difficulties in the Theory of Transfinite Numbers and Order Types. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 4(1), 29-53. [10.1112/plms/s2-4.1.29](https://doi.org/10.1112/plms/s2-4.1.29)
- RUSSELL, B. (1907). The Regressive Method of Discovering the Premises of Mathematics. Dans
RUSSELL, B. (1973). *Essays in Analysis*. (Édité par D. Lackey). Londres: Allen & Unwin.
- RUSSELL, B. (1908). Mathematical Logic as Based on the Theory of Types. *American Journal of Mathematics*, 30, 222-262.
- RUSSELL, B. (1914a). *Our Knowledge of the External World*: Chicago-Londres: The Open Court Publishing Company.
- RUSSELL, B. (1914b). On the Nature of Acquaintance. *The Monist*, 24(3), 1-16, 161-187, 435-453. [10.5840/monist191424311](https://doi.org/10.5840/monist191424311)
- RUSSELL, B. (1915). The Ultimate Constituents of Matter. *The Monist*, 25(3), 399-417. [10.5840/monist191525326](https://doi.org/10.5840/monist191525326)
- RUSSELL, B. (1918). The Philosophy of Logical Atomism. *The Monist*, 28(4), 495-527. [10.5840/monist19182843](https://doi.org/10.5840/monist19182843)
- RUSSELL, B. (1919). *Introduction to Mathematical Philosophy*. Londres: Allen & Unwin.
- RUSSELL, B. (1924). Logical Atomism. Dans MUIRHEAD, J. M. (dir.) (1924). *Contemporary British Philosophy*. Londres: Allen & Unwin.
- RUSSELL, B. (1989). *Écrits de logique philosophique*. (Textes édités et traduits par Jean-Michel Roy). Paris : PUF.

- RUSSELL, B. (1991). *Introduction à la philosophie mathématique*. (Traduit par François Rivenc). Paris : Payot.
- RUSSELL, B. (2007). *Mysticisme et logique*. (Traduit sous la direction de D. Vernant). Paris : Vrin.
- RUSSELL, E. S. (1930). *The Interpretation of Development and Heredity: A Study in Biological Method*. Oxford: Clarendon Press.
- RYLE, G. (1949). Meaning and Necessity. *Philosophy*, 24(88), 69-76. [10.1017/S0031819100006781](https://doi.org/10.1017/S0031819100006781)
- SAINT-HILAIRE, E. G. (1818). *Philosophie anatomique : des organes respiratoires sur le rapport de la détermination et de l'identité de leurs pièces osseuses*. Paris : J. P. Baillière.
- SAINT-HILAIRE, E. G. (1822). *Philosophie anatomique : des monstruosités humaines*. Paris : J. P. Baillière.
- SAINT-HILAIRE, E. G., CUVIER, F. (1824-1842). *Histoire naturelle des mammifères*. Paris : A. Belin.
- SARKAR, S. (1992). Models of reduction and categories of reductionism. *Synthese*, 91(3), 167-194. [10.1007/BF00413566](https://doi.org/10.1007/BF00413566)
- SARKAR, S. (1998). *Genetics and Reductionism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SARKAR, S. (1999). From the Reaktionsnorm to the Adaptive Norm: The Norm of Reaction, 1909–1960. *Biology and Philosophy*, 14, 235-252. [10.1023/A:1006690502648](https://doi.org/10.1023/A:1006690502648)
- SCHAFFNER, K. F. (1967). Approaches to reduction. *Philosophy of Science*, 34(2), 137-147. [10.1086/288137](https://doi.org/10.1086/288137)
- SCHAFFNER, K. F. (1969a). Theories and explanations in biology. *Journal of the History of Biology*, 2, 19-33. [10.1007/BF00137265](https://doi.org/10.1007/BF00137265)
- SCHAFFNER, K. F. (1969b). The Watson-Crick Model and Reductionism. *British Journal for the Philosophy of Science*, 20(4), 325-348. doi.org/10.1093/bjps/20.4.325
- SCHAFFNER, K. F. (dir.) (1985). *Logic of Discovery and Diagnosis in Medicine*. Los Angeles, CA: University of California Press.
- SCHAFFNER, K. F. (1993). *Discovery and Explanation in Biology and Medicine*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- SCHAFFNER, K. F. (1974). Reductionism in Biology: Prospects and Problems. Dans COHEN, R. S., et al. (dir.) (1974). *PSA 1974*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.

- SCHILPP, P. A. (dir.) (1963). *The Philosophy of Rudolf Carnap*. LaSalle, IL: Open Court.
- SCHINDEWOLF, H. O. (1936). *Paläontologie, Entwicklungslehre, und Genetik*. Berlin: Borntraeger Verlag.
- SCHINDEWOLF, H. O. (1950). *Grundfragen der Paläontologie*. Stuttgart: Schweizerbart Verlag.
- SCHLICK, M. (1931). Die Kausalität in der gegenwertigen Physik. *Die Naturwissenschaften*, 19,145-162.
- SCHLICK, M. (1936). Meaning and Verification. *Philosophical Review*, 45, 339-369. [10.2307/2180487](https://doi.org/10.2307/2180487)
- SCHMALHAUSEN, I. I. (1949). *Factors of Evolution: The Theory of Stabilizing Selection*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 1ère édition.
- SCHMALHAUSEN, I. I. (1986). *Factors of Evolution: The Theory of Stabilizing Selection*. Chicago, IL: University of Chicago Press. 2ème édition.
- SCHMIDT, G. (2011). *Relational Mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SCHMITT, S. (200). L'œuvre de Richard Goldschmidt : Une tentative de synthèse de la génétique, de la biologie du développement et de la théorie de l'évolution autour du concept d'homéose. *Revue d'Histoire des Sciences*, 53(3-4), 381-400.
- SCHMITZ, F. (2009). *Le Cercle de Vienne*. Paris : Vrin.
- SCHNITZLER, C. E., et al. (2012). Genomic organization, evolution, and expression of photoprotein and opsin genes in *Mnemiopsis leidyi*: A new view of ctenophore photocytes. *BMC Biology*, 10, 1-26. [10.1186/1741-7007-10-107](https://doi.org/10.1186/1741-7007-10-107)
- SCHRÖDER, B. (2016). *Ordered Sets. An Introduction with Connections from Combinatorics to Topology*. Bâle: Birkhäuser Verlag. 2ème édition.
- SEBESTIK, J. (2010). Préhistoire du Cercle de Vienne. Dans SOULEZ, A., et al. (dir.) (2010).
- SEILACHER, A. (1970). Arbeitskonzept zur Konstruktionsmorphologie. *Lethaia*, 3(4), 393-396. [10.1111/j.1502-3931.1970.tb00830.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1970.tb00830.x)
- SEILACHER, A. (1972). Divaricate patterns in pelecypod shells. *Lethaia*, 5(3), 325-343. [10.1111/j.1502-3931.1972.tb00862.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1972.tb00862.x)
- SELLARS, W. (1963). *Science, Perception and Reality*. Londres: Routledge & Kegan Paul.

- SEPKOSKI, D. (2009). The emergence of paleobiology. Dans SEPKOSKI, D., RUSE, M. (2009). *The Paleobiological Revolution: Essays on the Growth of Modern Paleontology*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- SHAPIRO, S., KISSELL, T. K. (2018). Classical Logic. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/logic-classical/>
- SIMPSON, G. G. (1939). *Quantitative Zoology*. New York-Londres : MacGraw-Hill.
- SIMPSON, G. G. (1944). *Tempo and Mode in Evolution*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- SIMPSON, G. G. (1949). *The Meaning of Evolution: A Study of the History of Life and of its Significance for Man*. New Haven, CT: Yale University Press.
- SIMPSON, G. G. (1950a). L'orthogenèse et la théorie synthétique de l'évolution. Dans *Paléontologie et transformisme*. Paris : Albin Michel.
- SIMPSON, G. G. (1950b). *Rythme et modalités de l'évolution*. Paris : Albin Michel.
- SIMPSON, G. G. (1953). *The Major Features of Evolution*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- SIMPSON, G. G. (1962). The status of the study of organisms. *American Scientist*, 50(1), 36-45.
- SIMPSON, G. G. (1963). Biology and the nature of science. *Science*, 139(3550), 81-88. [10.1126/science.139.3550.81](https://doi.org/10.1126/science.139.3550.81)
- SIMPSON, G. G. (1964). *This View of Life : The World of an Evolutionist*. New York, N. Y.: Harcourt, Brace & World.
- SIMPSON, G. G. (1967). The crisis in biology. *The American Scholar*, 36(3), 363-377.
- SIMPSON, G. G. (1974). The concept of progress in organic evolution. *Social Research*, 41(1), 28-51.
- SMART, J. J. C. (1963). *Philosophy and Scientific Realism*. Londres: Routledge.
- SMITH, J. M. (1982). *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge: Cambridge University Press.
- SMITH, J. M., PRICE, G. R. (1973). The Logic of Animal Conflict. *Nature*, 246, 15-18. [10.1038/246015a0](https://doi.org/10.1038/246015a0)
- SMITH, P. (2007). *An Introduction to Gödel's Theorem*. Cambridge: Cambridge University Press.

- SMOCOVITIS, V. B. (1992). Unifying Biology: The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology. *Journal of the History of Biology*, 25(1), 1-65. [10.1007/BF01947504](https://doi.org/10.1007/BF01947504)
- SMOCOVITIS, V. B. (1996). *Unifying Biology: The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- SMORYNSKI, C. (1977). The Incompleteness Theorems. Dans BARWISE, J. (dir.). *Handbook of Mathematical Logic*. Amsterdam: North-Holland.
- SMULLYAN, R. (1992). *Gödel's Incompleteness Theorems*. Oxford: Oxford University Press.
- SNEED, I. (1971). *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Dordrecht: Reidel.
- SOBER, E. (1984a). *The Nature of Selection: Evolutionary Theory in Philosophical Focus*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- SOBER, E. (1984b). Fact, Fiction, and Fitness: A Reply to Rosenberg. *Journal of Philosophy*, 81(7), 372-383. [jphil198481745](https://doi.org/10.2307/2324817)
- SOULEZ, A., et al. (dir.) (2010). *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits. Carnap, Hahn, Neurath, Schlick, Waissman sur Wittgenstein*. Paris: Vrin. 2ème édition.
- STADLER, F. (2007). The Vienna Circle: Context, Profile, and Development. Dans RICHARDSON, A., UEBEL, T. (2007). *The Cambridge Companion to Logical Empiricism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- STEBBINS, G. L. (1950). *Variation and Evolution in Plants*. New York, N. Y.: Columbia University Press.
- STEBBINS, G. L., AYALA, F. J. (1981). Is a New Evolutionary Synthesis Necessary? *Science*, 213(4511), 967-971. [10.1126/science.213.4511.967](https://doi.org/10.1126/science.213.4511.967)
- STEGMÜLLER, W. (1976). *The Structure and Dynamics of Theories*. New York, N. Y.: Springer.
- STERN, D. L. (2000). Evolutionary developmental biology and the problem of variation. *Evolution: International Journal of Organic Evolution*, 54, 1079-1091. [10.1111/j.0014-3820.2000.tb00544.x](https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00544.x)
- STRESEMAN, E. (1926). Übersicht über die Mutationsstudien I-XXIV und ihre wichtigsten Ergebnisse. *Journal für Ornithologie*, 74, 377-385.
- STRESEMAN, E. (1936). Zur Frage der Artbildung in der Gattung *Geospiza*. *Orgaan der Club von Nederlandsche Vogelkundigen*, 9, 13-21.
- STURTEVANT, A. H. (1918). An analysis of the effects of selection. *Carnegie Institution of Washington Publication*, 264.

- SUMNER, F. B. (1918). Continuous and discontinuous variation and their inheritance in *Peromyscus*. *American Naturalist*, 52(616-617), 177-208. [10.1086/279662](https://doi.org/10.1086/279662)
- SUMNER, F. B. (1932). Genetic, distributional, and evolutionary studies of the subspecies of deer mice (*Peromyscus*). *Genetica*, 9, 1-106.
- SUPPE, F. (1971). On partial interpretation. *Journal of Philosophy*, 68(3), 57-76. [10.2307/2025168](https://doi.org/10.2307/2025168)
- SUPPE, F. (1972). What's wrong with the received view on the structure of scientific theories? *Philosophy of Science*, 39(1), 1-19. [10.1086/288405](https://doi.org/10.1086/288405)
- SUPPE, F. (1973a). Facts and Empirical Truth. *Canadian Journal of Philosophy*, 3(2), 197-212. [10.1080/00455091.1973.10716876](https://doi.org/10.1080/00455091.1973.10716876)
- SUPPE, F. (1973b). Theories, their formulations, and the operational imperative. *Synthese*, 25(1-2), 129-164. [10.1007/BF00485000](https://doi.org/10.1007/BF00485000)
- SUPPE, F. (1973c). Theories and Phenomena. Dans LEINFELLNER, W., KOHLER, E. (dir.) (1974). *Developments in the Methodology of Social Science*. Dordrecht: Reidel.
- SUPPE, F. (dir.) (1977). *The Structure of Scientific Theories*. Chicago, IL: University of Illinois Press. Réimpression.
- SUPPES, P. (1957). *Introduction to Logic*. Princeton, N.J.: Van Nostrand.
- SUPPES, P. (1960). *Axiomatic Set Theory*. Princeton, N. J.: D. van Nostrand Company.
- SUPPES, P. (1961). Probability concepts in quantum mechanics. *Philosophy of Science*, 28(4), 378-389. [10.1086/287824](https://doi.org/10.1086/287824)
- SUPPES, P. (1962). Models of Data. Dans NAGEL, E., SUPPES, P., TARSKI, A. (dir.) (1962). *Logic, Methodology and Philosophy of Science*. Stanford, CA: Stanford University Press.
- SUPPES, P. (1967). What is a Scientific Theory? Dans MORGENBESSER, S. (dir.) (1967). *Philosophy of Science Today*. New York, N. Y.: Basic Books.
- SUPPES, P. (1969). *Studies in the Methodology and Foundations of Science*. Dordrecht: Reidel.
- SUPPES, P. (1974). The Structure of Theories and the Analysis of Data. Dans SUPPE, F. (dir.) (1974). *The Structure of Scientific Theories*. Chicago, IL: University of Illinois Press.
- SUPPES, P. (1993). *Models and Methods in the Philosophy of Science: Selected Essays*. Dordrecht: Springer Netherlands.

- SUPPES, P. (2002). *Representation and Invariance of Scientific Structure*. Chicago, IL: CSLI Publication-Chicago University Press.
- SUTTON, W. S. (1902). On the morphology of the chromosome group in *Brachystola magna*. *Biological Bulletin*, 4, 24-39.
- SUTTON, W. S. (1903). 1903 The chromosomes in heredity. *Biological Bulletin*, 4, 231-251.
- TARSKI, A. (1935a). Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen. *Studia Philosophica*, 1, 261-405.
- TARSKI, A. (1935b). Einige methodologische Untersuchungen über die Definierbarkeit der Begriffe. *Erkenntnis*, 5, 80-100.
- TARSKI, A. (1936). Über den Begriff der logischen Folgerung. Dans *Actes du Congrès international de philosophie scientifique, Sorbonne, Paris 1935*, vol. VII. Paris: Hermann
- TARSKI, A. (1944). The semantic conception of truth and the foundations of semantics. *Philosophy and Phenomenological Research*, 4(3), 341-376. [10.2307/2102968](https://doi.org/10.2307/2102968)
- TARSKI, A. (1956). *Logic, Semantics, Metamathematics*. (Traduit par J. H. Woodger). Oxford: Clarendon Press.
- TARSKI, A. (1974). *Logique, sémantique, métamathématique*. (Volume 2 : 1923-1944). (Traduit par Gilles-Gaston Granger). Paris : Armand Colin.
- TCHETVERIKOV, S. (1927). Über die genetische Beschaffenheit wilder Populationen. *Verhandlungen des V Internationalen Kongresses für Vererbungswissenschaft. Berlin*, 2, 1499-1500.
- TCHETVERIKOV (1921) / TCHETVERIKOV, S., LERNER, I. M., PARKER, M. (1961). On certain aspects of the evolutionary process from the standpoint of modern genetics. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 105, 167-195.
- TEILHARD DE CHARDIN, P. (1955). *Le Phénomène humain*. Paris : Éditions du Seuil.
- TEILHARD DE CHARDIN, P. (1965). *La Place de l'homme dans la nature*. Paris : Albin Michel.
- TENNANT, N. (2017). Logicism and Neologicism. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/logicism/>
- THOMPSON, D'ARCY W. (1942). *On Growth and Form*. New York, N. Y.: Macmillan. 2ème édition.

- THOMPSON, P. (1983). The Structure of Evolutionary Theory: A Semantic Approach. *Studies in History and Philosophy of Science*, 14, 215-229. [10.1016/0039-3681\(83\)90013-4](https://doi.org/10.1016/0039-3681(83)90013-4)
- THOMPSON, P. (1985). Sociobiological Explanation and the Testability of Sociobiological Theory. Dans FETZER, J. H. (dir.) (1985). *Sociobiology and Epistemology*. Dordrecht: Reidel.
- THOMPSON, P. (1986). The Interaction of Theories and the Semantic Conception of Evolutionary Theory. *Philosophica*, 37, 73-86.
- THOMPSON, P. (1987). A Defence of the Semantic Conception of Evolutionary Theory. *Biology and Philosophy*, 2, 26-32.
- THOMPSON, P. (1989). *The Structure of Biological Theories*. New York, N. Y.: State University of New York Press.
- THULASIRAMAN, K., SWAMY, M. N. S. (1992). *Graphs: Theory and Algorithms*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapour: John Wiley & Sons.
- TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1926). Ein Fall geschlechtsgebundener balancierter Lethalfaktoren bei *Drosophila melanogaster*. *Wilhelm Roux Archiv für die Entwicklungsmechanik der Organismen*, 107(4), 651-671. [10.1007/BF02079912](https://doi.org/10.1007/BF02079912).
- TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1927a). Studies on the phenotype manifestation of hereditary factors. I. On the phenotypic manifestation of the genovariation radius incompletus in *Drosophila funebris*, *Genetics*, 12(3), 128-198.
- TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1927b). A Reverse Genovariation in *Drosophila funebris*. *Genetics*, 12(2), 125-127.
- TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1939). Genetik und Evolutionsforschung. *Verhandlungen der deutschen zoologischen Gesellschaft, 1939, Zoologischer Anzeiger Supplementband*.
- TIMOFEÏEV-RESSOVSKI, N. (1940). Mutations and geographical variation. Dans HUXLEY, J. (dir.) (1940).
- TORRETTI, R. (1978). *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*. Dordrecht: Reidel.
- TOULMIN, S. (1972). *Human Understanding*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- TROELSTRA, A. S., VAN DALEN, D. (1988). *Constructivism in Mathematics*. (Volume 1). Amsterdam: Elsevier.
- UEBEL, T. (1992). *Overcoming Logical Positivism from Within: The Emergence of Neurath's Naturalism in the Vienna Circle's Protocol Sentence Debate*. Amsterdam-Atlanta: Rodopi.

- UEBEL, T. (1993). Neurath's Protocol Statements: A Naturalistic Theory of Data and Pragmatic Theory of Theory Acceptance. *Philosophy of Science*, 60, 587-607.
- UEBEL, T. (1996). The Enlightenment Ambition of Epistemic Utopianism: Otto Neurath's Theory of Science in Historical Perspective. Dans GIÈRE, R. N., RICHARDSON, A. W. (dir.) (1996).
- UEBEL, T. (2014). Vienna Circle. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/vienna-circle/>
- VAN BENTHEM, J. (1982). The logical study of science. *Synthese*, 51, 431-472. [10.1007/bf00485263](https://doi.org/10.1007/bf00485263)
- VAN BENTHEM, J. (2012). The logic of empirical theories revisited. *Synthese*, 186, 775-792. [10.1007/s11229-011-9916-6](https://doi.org/10.1007/s11229-011-9916-6)
- VAN DALEN, D. (1994). *Logic and Structure*. Londres: Springer Verlag. 3ème édition.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1970). On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories. *Philosophy of Science*, 37, 325-339. [10.1086/288311](https://doi.org/10.1086/288311)
- VAN FRAASSEN, B. C. (1972). A Formal Approach to Philosophy of Science. Dans COLODNY, R. E. (dir.) (1972). *Paradigms and Paradoxes*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1974). The labyrinth of quantum logic. Dans COHEN, R. S., WARTOFSKY, M. (1974). *Logical and Empirical Studies in Contemporary Physics*. Dordrecht: Reidel.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1976). To save the phenomena. *Journal of Philosophy*, 73(18), 623-632. [10.2307/2025818](https://doi.org/10.2307/2025818)
- VAN FRAASSEN, B. C. (1980a). *The Scientific Image*. Oxford-New York: Oxford University Press.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1980b). Theory Construction and Experiment: An Empiricist View. Dans ASQUITH, P. D., GIÈRE, R. N. (dir.) (1980). *PSA 1980*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford: Oxford University Press.
- VAN FRAASSEN, B. C. (1994). *Lois et symétrie*. Paris : Vrin.
- VAN FRAASSEN, B. C. (2008). *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*. Oxford: Clarendon Press.
- VAN STIGT, W. P. (1990). *Brouwer's intuitionism*. Amsterdam North-Holland.

- VAN STIGT, W. P. (1998). Intuitionism. Dans MANCOSU, P. (dir.) (1998).
- VOLTAIRE (1759). *Candide ou L'Optimisme*. Genève : Cramer.
- VON BAER, K. E. (1828). *Ueber Entwicklungsgeschichte der Thiere. Beobachtung und Reflexion, Theil I*. Königsberg: Borntraeger Verlag.
- VON HELMHOLTZ, H. (1868). Über die Thatsachen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. Dans *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 9.
- VON HELMHOLTZ, H. (1921). *Schriften zur Erkenntnistheorie*. (Édité et commenté par Paul Hertz et Moritz Schlick). Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- VON MISES, R. (1928). *Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit*. Vienne: Springer Verlag.
- VORMS, M. (2009). Théories, modes d'emploi : une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques. Thèse soutenue à l'Université de Paris 1 sous la direction de Jean Gayon et d'Anouk Barberousse.
- VORMS, M. (2011). *Qu'est-ce qu'une théorie scientifique ?* Paris : Vuibert.
- WADDINGTON, C. H. (1957). *The Strategy of the Genes*. Londres: Allen & Unwin. 1ère édition.
- WADDINGTON, C. H. (2014). *The Strategy of the Genes*. New York, N. Y.: Routledge. 2ème édition.
- WADDINGTON, C. H., COWE, J. R. (1969). Computer simulation of a Mulluscan pigmentation pattern. *Journal of Theoretical Biology*, 25(2), 219-225. [10.1016/S0022-5193\(69\)80060-3](https://doi.org/10.1016/S0022-5193(69)80060-3)
- WAGNER, P. (2001). Le contexte logique de l'*Aufbau*. Russell et Carnap. Dans LAUGIER, S. (dir.) (2001).
- WAGNER, P. (dir.) (2009). *Carnap's Logical Syntax of Language*. New York, N. Y.: Palgrave Macmillan.
- WAGNER, P. (2014). *Logique et Philosophie*. Paris: Ellipses.
- WAHL, R. (2011). The Axiom of Reducibility. *Russell: The Journal of Bertrand Russell Studies*, 31(1), 45-62. [10.15173/russell.v31i1.2205](https://doi.org/10.15173/russell.v31i1.2205)
- WAISMANN, F. (1930). Logische Analyse des Wahrscheinlichkeitsbegriffs. *Erkenntnis*, 1(1), 228-248. [10.1007/BF00208618](https://doi.org/10.1007/BF00208618)
- WALLACE, A. R. (1858). On the Tendency of Varieties to depart indefinitely from the Original Type. *Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London. Zoology*, 3, 45-50.

- WALLACE, A. R. (1870). *Contributions to the Theory of Natural Selection*. Londres: Macmillan.
2ème édition.
- WALLACE, A. R. (1899). *Darwinism*. Londres: Macmillan.
- WEBER, M. (2005). *Philosophy of experimental biology*. Cambridge-New York: Cambridge University Press.
- WEIDENREICH, F. (1929). Vererbungsexperiment und vergleichende Morphologie. *Paläontologische Zeitschrift*, 11, 275-286.
- WEINBERG, W. (1908). Über den Nachweis der Vererbung beim Menschen. *Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg*, 64, 369-382.
- WEISMANN, A. (1868). *Über die Berechtigung der Darwin'schen Theorie*. Leipzig: Engelmann Verlag.
- WEISMANN, A. (1875). *Studien zur Descendenz-Theorie: I. Ueber den Saison-Dimorphismus der Schmetterlinge*. (Volume 1). Leipzig: Engelmann Verlag.
- WEISMANN, A. (1876). *Studien zur Descendenz-Theorie: II. Ueber die letzten Ursachen der Transmutationen*. (Volume 2). Leipzig: Engelmann Verlag.
- WEISMANN, A. (1883). *Ueber die Vererbung: ein Vortrag*. Jena: Fischer Verlag.
- WEISMANN, A. (1892). *Das Keimplasma. Eine Theorie der Vererbung*. Jena: Fischer Verlag.
- WEISMANN, A. (1909). *Die Selektionstheorie*. Jena: Fischer Verlag.
- WESSELS, L. (1974). Laws and Meaning Postulates in van Fraassen's View of Theories. Dans COHEN, R. S. *et al.* (dir.) (1974). *PSA 1974*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- WEYL, H. (1918). *Das Kontinuum. Kritische Untersuchungen über die Grundlagen der Analysis*. Berlin-Leipzig: Teubner.
- WEYL, H. (1921). Über die neue Grundlagenkrise der Mathematik. *Mathematische Zeitschrift*, 10, 39-79.
- WEYL, H. (1926). *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft*. Munich: Leibniz Verlag.
- WHITE, M. J. D. (1945). *Animal Cytology and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WHITE, M. J. D. (1968). Models of speciation. *Science*, 159(3819), 1065-1070.
10.1126/science.159.3819.1065

- WHITE, M. J. D. (1978). *Modes of Speciation*. San Francisco, CA: W. H. Freeman & Co.
- WHITE, M. J. D. (1981). Tales of Long Ago – The Birth of Evolutionary Theory as a Scientific Discipline. *Paleobiology*, 7(2), 287-291. [10.1017/S0094837300004085](https://doi.org/10.1017/S0094837300004085)
- WHITEHEAD, A. N., RUSSELL, B. (1910). *Principia Mathematica*. (Volume 1). Cambridge: Cambridge University Press.
- WHITEHEAD, A. N., RUSSELL, B. (1912). *Principia Mathematica*. (Volume 2). Cambridge: Cambridge University Press.
- WHITEHEAD, A. N., RUSSELL, B. (1913). *Principia Mathematica*. (Volume 3). Cambridge: Cambridge University Press.
- WILLIAMS, M. B. (1970). Deducing the Consequences of Evolution: A Mathematical Model? *Journal of Theoretical Biology*, 29, 343-385.
- WILLIAMS, M. B. (1973a). Falsifiable Predictions of Evolutionary Theory. *Philosophy of Science*, 40(4), 518-537.
- WILLIAMS, M. B. (1973b). The Logical Status of Natural Selection and Other Evolutionary Controversies. Dans BUNGE, M. (dir.) (1973). *The Methodological Unity of Science*. Dordrecht: Reidel.
- WILLIAMS, M. B. (1980). Similarities and Differences between Evolutionary Theory and the Theories of Physics. Dans ASQUITH, P. D., GIERE, R. N. (1980). *PSA 1980*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- WILLIAMS, M. B. (1982). The Importance of Prediction Testing in Evolutionary Biology. *Erkenntnis*, 17(3), 291-306.
- WILLIAMS, M. B., ROSENBERG, A. (1985). “Fitness” in Fact and Fiction: A Rejoinder to Sober. *The Journal of Philosophy*, 82(12), 738-749.
- WILLIAMS, G. C. (1966). *Adaptation and Natural Selection*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- WILLIAMS, G. C. (1992). *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges*. Oxford: Oxford University Press.
- WIMSATT, W. C. (1972a). Teleology and the Logical Structure of Function Statements. *Studies in History and Philosophy of Science*, 3(1), 1-80.

- WIMSATT, W. C. (1972b). Complexity and Organization. Dans SCHAFFNER, K. F., COHEN, R. S. (dir.) (1972). *PSA 1972*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- WIMSATT, W. C. (1974). Reductive Explanation: A Functional Account. Dans COHEN, R. S., *et al.* (dir.) (1974). *PSA 1974*. East Lansing, Mich.: Philosophy of Science Association.
- WINDELBAND, W. (1892). *Geschichte der Philosophie*. Freiburg: Mohr Verlag.
- WINTHER, R. (2012). Darwin's pluralism, then and now. *Metascience*, 21, 157-161. [10.1007/s11016-011-9578-5](https://doi.org/10.1007/s11016-011-9578-5)
- WINTHER, R. (2015). The Structure of Scientific Theories. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/structure-scientific-theories/>
- WITTGENSTEIN, L. (1922). *Tractatus Logico-Philosophicus*. Londres : Kegan Paul.
- WITTGENSTEIN, L. (1993). *Tractatus logico-philosophicus*. (Traduit par Gilles-Gaston Granger). Paris : Gallimard.
- WOJCICKI, R. (1974). Set Theoretic Interpretations of Empirical Phenomena. *Journal of Philosophical Logic*, 3, 337-343.
- WOLTERECK, R. (1909). Weitere experimentelle Untersuchungen über Artveränderung, speziell über das Wesen quantitativer Artunterschiede bei Daphnien. *Verhandlungen der deutschen zoologischen Gesellschaft, 1909*, 110-173.
- WOLTERS, G. (1999). Wrongful Life: Logico-Empiricism's Philosophy of Biology. Dans GALAVOTTI, M. C., PAGININI, A. (1999). *Experience, Reality, and Scientific Explanation. Essays in Honour of Merrilee and Wesley Salmon*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- WOLTERS, G. (2018). "Wrongful Life" Reloaded: Logical empiricism's philosophy of biology 1934-1936 (Prague/Paris/Copenhagen). With historical and political intermezzos. *Philosophia Scientiae*, 22(3), 233-255. [10.4000/philosophiascientiae.1641](https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.1641)
- WOODGER, J. H. (1921). Notes on a Cestode Occurring in Mesopotamia. *Annals of Applied Biology*, 7, 345-351.
- WOODGER, J. H. (1924). *Elementary Morphology and Physiology for Medical Students*. Oxford: Oxford University Press.
- WOODGER, J. H. (1928). Science and Metaphysics in Biology. *Science Progress*, 23, 303-339.
- WOODGER, J. H. (1929a). *Biological Principles: A Critical Study*. Londres: Routledge & Kegan Paul.

- WOODGER, J. H. (1929b). Some Aspects of Biological Methodology. *Proceedings of the Aristotelian Society, New Series*, 29, 351-358.
- WOODGER, J. H. (1930a). The “Concept of Organism” and the Relation Between Embryology and Genetics, Part I”, *The Quarterly Review of Biology*, 5(1), 1-22.
- WOODGER, J. H. (1930b). The “Concept of Organism” and the Relation Between Embryology and Genetics, Part II”, *The Quarterly Review of Biology*, 5(4), 438-465.
- WOODGER, J. H. (1931). The “Concept of Organism” and the Relation Between Embryology and Genetics, Part III”, *The Quarterly Review of Biology*, 6(2), 178-207.
- WOODGER, J. H. (1937). *The Axiomatic Method in Biology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WOODGER, J. H. (1939). *The Technique of Theory Construction*. Chicago, IL: University of Chicago Press
- WOODGER, J. H. (1945). On Biological Transformations. Dans LE GROS CLARK, W. E., MEDAWAR, P. B. (dir.) (1945). *Essays on Growth and Form, presented to D’Arcy Wentworth Thompson*. Oxford: Oxford University Press.
- WOODGER, J. H. (1948). Observations on the Present State of Embryology. *Symposium for the Society of Experimental Embryology, Growth*, 351-365.
- WOODGER, J. H. (1951). Science Without Properties. *British Journal for the Philosophy of Science*, 2(7), 193-216.
- WOODGER, J. H. (1952a). *Biology and Language: An Introduction to the Methodology of the Biological Sciences including Medicine*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WOODGER, J. H. (1952b). From Biology to Mathematics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 3(9), 1-21.
- WOODGER, J. H. (1958). Formalization in Biology. *Logique et Analyse, Nouvelle Série*, 1, 3-4.
- WOODGER, J. H. (1962). Biology and the Axiomatic Method. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 96, 1093-1104.
- WOODGER, J. H. (1968). Many-Termed Relations in Biology. *Acta Biotheoretica*, 18, 1-4.
- WOODWARD, J. (2003). Scientific Explanation. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/scientific-explanation/>
- WRIGHT, L. (1973). Functions. *The Philosophical Review*, 82(2), 139-168. [10.2307/2183766](https://doi.org/10.2307/2183766)

- WRIGHT, S. (1916). An intensive study of the inheritance of color and of other coat characters in guinea pigs with especial reference to graded variation. *Carnegie Institution of Washington Publication*, 241, 59-160.
- WRIGHT, S. (1917a). The average correlation within subgroups of a population. *Journal of the Washington Academy of Science*, 7(17), 532-535.
- WRIGHT, S. (1917b). Color inheritance in mammals, I. *Journal of Heredity*, 8(5), 224-235. [10.1093/oxfordjournals.jhered.a111784](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a111784)
- WRIGHT, S. (1918). On the nature of size factors. *Genetics*, 3(4), 367-374.
- WRIGHT, S. (1919). Scientific principles applied to breeding. *Breeders Gazette*, 75, 401-402.
- WRIGHT, S. (1920). The relative importance of heredity and environment in determining the piebald pattern of guinea pigs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6(6), 320-332. [10.1073/pnas.6.6.320](https://doi.org/10.1073/pnas.6.6.320)
- WRIGHT, S. (1921a). Systems of mating, I: The biometric relation between parent and offspring. *Genetics*, 6(2), 111-123.
- WRIGHT, S. (1921b). Systems of mating, II: The effects of inbreeding on the genetic composition of a population. *Genetics*, 6(2), 124-143.
- WRIGHT, S. (1921c). Systems of mating, III: Assortative mating based on somatic resemblance. *Genetics*, 6(2), 144-161.
- WRIGHT, S. (1921d). Systems of mating, IV: The effects of selection. *Genetics*, 6(2), 162-166.
- WRIGHT, S. (1921e). Systems of mating, V: General considerations. *Genetics*, 6(2), 168-178.
- WRIGHT, S. (1922). Coefficients of inbreeding and relationship. *American Naturalist*, 56(645), 330-338. [10.1086/279872](https://doi.org/10.1086/279872)
- WRIGHT, S. (1923a). The theory of path coefficients: A reply to Niles' criticism. *Genetics*, 8(3), 239-255.
- WRIGHT, S. (1923b). Mendelian analysis of the pure breeds of livestock, I: The measurement of inbreeding and relationship. *Journal of Heredity*, 14(8), 339-348. [10.1093/oxfordjournals.jhered.a102354](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a102354)
- WRIGHT, S. (1929). Fisher's theory of dominance. *American Naturalist*, 63(686), 274-279.
- WRIGHT, S. (1930). Review of *The genetical theory of natural selection*, by R. A. Fisher. *Journal of Heredity*, 21, 349-356.

- WRIGHT, S. (1931a). Evolution in Mendelian populations. *Genetics*, 16(2), 97-159.
- WRIGHT, S. (1931b). Wright to Fisher, February 3, 1931. Dans PROVINE, W. B. (1986).
- WRIGHT, S. (1932). The roles of mutation, inbreeding, crossbreeding and selection in evolution. *Proceedings of the Sixth International Congress of Genetics*, 1, 356-366.
- WRIGHT, S. (1933). Inbreeding and homozygosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 19(4), 411-420. [10.1073/pnas.19.4.411](https://doi.org/10.1073/pnas.19.4.411)
- WRIGHT, S. (1935). Evolution in populations in approximate equilibrium. *Journal of Genetics*, 30, 257-266. [10.1007/BF02982240](https://doi.org/10.1007/BF02982240)
- WRIGHT, S. (1937a). The Distribution of Gene Frequencies in Populations. *Science*, 85(2212), 504. [10.1126/science.85.2212.504](https://doi.org/10.1126/science.85.2212.504)
- WRIGHT, S. (1937b). The Distribution of Gene Frequencies in Populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 26(3), 307-320. [10.1073/pnas.23.6.307](https://doi.org/10.1073/pnas.23.6.307)
- WRIGHT, S. (1951). The genetical structure of populations. *Annals of Eugenics*, 15, 323-354. [10.1111/j.1469-1809.1949.tb02451.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1949.tb02451.x)
- WRIGHT, S. (1978). The relation of livestock breeding to theories of evolution. *Journal of Animal Science*, 46(5), 1192-1200. [10.2527/jas1978.4651192x](https://doi.org/10.2527/jas1978.4651192x)
- WRIGHT, S., PROVINE, W. B. (1986). *Evolution. Selected Papers*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- YUNEZ-NAUDE, N. (2001). L'usage des mathématiques dans l'*Aufbau*. Dans LAUGIER, S. (dir.) (2001).
- ZABELL, L. S. (2005). *Symmetry and Its Discontents: Essays on the History of Inductive Probability*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ZABELL, L. S. (2007). Carnap on probability and induction. Dans CREATH, R., FRIEDMAN, M. (dir.) (2007). *The Cambridge Companion to Carnap*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ZABELL, L. S. (2011). Carnap and the Logic of Inductive Inference. Dans GABBAY, D. M., *et al.* (dir.) (2011).
- ZACH, R. (2019). Hilbert's Program. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/hilbert-program/>
- ZERMELO, E. (1904). Beweis, daß jede Menge wohlgeordnet werden kann. *Mathematische Annalen*, 59, 514-516.

ZERMELO, E. (1908a). Neuer Beweis für die Möglichkeit einer Wohlordnung. *Mathematische Annalen*, 65, 107-128.

ZERMELO, E (1908b). Untersuchungen über die Grundlagen der Mengenlehre, I. *Mathematische Annalen*, 65, 261-281.

ZERMELO, E. (1929). Über den Begriff von Definitheit in der Axiomatik. *Fundamenta Mathematicae*, 14, 339-344.

ZERMELO, E. (1930). Über Grenzzahlen und Mengenbereiche: Neue Untersuchungen über die Grundlagen der Mengenlehre. *Fundamenta Mathematicae*, 16, 29-47. 10.4064/fm-16-1-29-47

**La formalisation de la théorie de l'évolution.
Une approche historique et philosophique**

Cette thèse a pour objet deux questions fondamentales qui relèvent, respectivement, de la philosophie générale des sciences et de la philosophie de la biologie. La première consiste à définir la notion même de cadre conceptuel, alors que l'autre est celle de savoir en quoi la théorie synthétique de l'évolution constituerait, justement, un cadre conceptuel pour les sciences de la vie. Son but est, par conséquent, double. D'une part, elle vise à montrer en quoi le recours à la conception classique des théories scientifiques (et plus généralement à la « boîte à outils » de l'empirisme logique) comme cadre analytique, dans le but de formaliser la notion même de cadre conceptuel, permet de résoudre les ambiguïtés qui sont associées à la définition de la théorie synthétique en tant qu'objet d'études pour les philosophes et pour les historiens de la biologie. D'autre part, elle vise également à prouver que l'application d'une telle reconstruction formelle de la notion de cadre conceptuel au cas spécifique de la théorie synthétique de l'évolution permet de montrer la pertinence et l'actualité de la conception classique des théories scientifiques. Pour ce faire, cette thèse développe une approche qui est à la fois historique et philosophique, en ceci qu'elle consiste à allier les outils de la reconstruction formelle des théories scientifiques à une double analyse généalogique. Une telle analyse porte, d'une part, sur la conception classique des théories scientifiques elle-même (notamment telle qu'elle a été développée par Rudolf Carnap) et, d'autre part, sur la théorie synthétique en tant que cadre conceptuel (telle qu'elle s'est constituée sous la contrainte exercée par les modèles mathématiques de la génétique théorique des populations).

**The formalisation of evolutionary theory.
A historical and philosophical approach**

This dissertation deals with two fundamental questions which fall, respectively, within the scope of the general philosophy of science and within the scope of the philosophy of biology. The first question consists in defining the very notion of conceptual framework, while the other pertains to the epistemological status of the Modern Evolutionary Synthesis as a possible conceptual framework for the life sciences. Its purpose is, therefore, twofold. On the one hand, this dissertation aims to show how relying on the received view of scientific theories (and more generally of the conceptual "toolbox" of logical empiricism) as an analytical framework – with the aim of formalising the very notion of conceptual framework – allows dispelling the ambiguities associated with the

characterisation of the Modern Evolutionary Synthesis as an object of study for philosophers and historians of biology alike. On the other hand, this dissertation also aims to prove that the application of such a formal reconstruction of the notion of conceptual framework to the specific case of the Modern Evolutionary Synthesis makes it possible to highlight the relevance and topicality of the received view of scientific theories. To do so, this thesis develops an approach that is both historical and philosophical, since it consists in combining the tools of the formal reconstruction of scientific theories with a double genealogical analysis. Such an analysis comprises both a genealogy of the received view of scientific theories itself (notably as developed by Rudolf Carnap) and a genealogy of the Modern Evolutionary Synthesis as a conceptual framework (more precisely, as it was constituted under the constraints exerted by the mathematical models of theoretical population genetics).

Discipline : Philosophie.

Mots clés : théorie de l'évolution, structure des théories scientifiques, conception syntaxique des théories scientifiques, conception sémantique des théories scientifiques, cadre conceptuel, sélection naturelle.

Équipe d'accueil : Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques (UMR 8590), 13 rue du Four 75006, Paris.