



HAL
open science

L'activité prédictives des sciences empirique : analyse d'un succès scientifique et de sa portée

Gauvain Leconte

► **To cite this version:**

Gauvain Leconte. L'activité prédictives des sciences empirique : analyse d'un succès scientifique et de sa portée. Philosophie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2017. Français. NNT : 2017PA01H223 . tel-01936647

HAL Id: tel-01936647

<https://theses.hal.science/tel-01936647v1>

Submitted on 27 Nov 2018

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.

UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE



THÈSE

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

présentée et soutenue publiquement
le 6 décembre 2017 par

Gauvain LECONTE

L'ACTIVITÉ PRÉDICTIVE DES
SCIENCES EMPIRIQUES

Analyse d'un succès scientifique et de sa
portée

Sous la direction de Pierre WAGNER

Membres du Jury :

Anjan CHAKRAVARTY	Professeur à l'Université de Notre-Dame
Max KISTLER	Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Stéphanie RUPHY	Professeure à l'Université Grenoble Alpes
David VALLS-GABAUD	Directeur de recherche au CNRS, LERMA, Observatoire de Paris-Meudon
Peter VICKERS	<i>Reader</i> à l'Université de Durham
Pierre WAGNER	Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Rapporteurs :

À déterminer

Année 2017

Gauvain LECONTE

L'ACTIVITÉ PRÉDICTIVE DES
SCIENCES EMPIRIQUES

Analyse d'un succès scientifique et de sa
portée

THÈSE

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

Sous la direction
de Pierre WAGNER

Remerciements

Cette thèse a été dirigée par Pierre Wagner, dont l'intelligence des remarques et la rigueur des relectures n'ont eu d'égales que la bienveillance et la liberté qu'il m'a laissée dans mes recherches. Je ne saurais suffisamment le remercier pour cela mais j'espère que ces quelques lignes témoigneront à ses yeux de ma gratitude.

Les résultats présentés dans cette thèse sont en partie issus de recherches effectuées dans le cadre du Diplôme d'Université *Structure de l'Univers* de l'Observatoire de Paris-Meudon et supervisées par David Valls-Gabaud. Je suis honoré et reconnaissant de sa présence dans mon jury de thèse. Je remercie aussi Max Kistler et Stéphanie Ruphy de participer à mon jury de thèse. Je suis particulièrement reconnaissant à Anjan Chakravartty de s'être déplacé depuis les États-Unis et à Peter Vickers d'avoir accepté de venir depuis le Royaume-Uni pour participer à ma soutenance.

J'adresse mes remerciements à l'IHPST pour m'avoir accueilli dans un cadre stimulant et à ses directeurs Jean Gayon et Max Kistler pour le soutien qu'ils m'ont offert durant ces quatre années. Je remercie également l'École Doctorale de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne et ses directrice et directeur, Chantal Jaquet et Pierre Marie Morel, qui m'ont permis de financer plusieurs missions à l'étranger et de réaliser une première publication dans les pages de *Philonsorbonne*. Je remercie l'UFR de Philosophie de l'Université Paris 1 au sein de laquelle j'ai pu enseigner l'épistémologie en tant que moniteur pendant trois ans.

Cette thèse a bénéficié de l'accueil exceptionnel de tous les membres des Diplômes d'Université « Explorer et Comprendre l'Univers » et « Structure de l'Univers » de l'Observatoire Paris-Meudon : Chantal Balkowski, Nawell Megri, Mathieu Puech, Nicole Romain et, à nouveau, David Valls-Gabaud. Les cours, les stages pratiques d'observation, les conseils et la gentillesse qu'elles et ils m'ont offerts m'ont passionné et m'ont tant appris que je peux aujourd'hui me rendre compte de tout ce qui me reste à apprendre. Ils m'ont donné une image formidable de l'astronomie et ont toute ma gratitude. Pour les mêmes raisons, je remercie aussi le cosmologiste Julien Grain qui m'a permis, autour de nombreux cafés, de mieux comprendre les pratiques des astrophysiciens et qui m'a offert l'opportunité de travailler avec lui.

Je remercie toutes les professeures et professeurs, chercheuses et chercheurs qui m'ont éclairé par leurs cours et leurs entretiens : Isabelle Rochet, Ma-

rio Alai, Gilles Dowek, François Drouot, George Ellis, Nadine de Courtenay, Alexandre Guay, Françoise Longy, Timothy Lyons, John Matthewson, Carles Ulises Moulines, Stathis Psillos, Kyle Stanford et John Worrall. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Marion Vorms qui a accepté de participer à ma soutenance de mi-parcours, à Isabelle Drouet et Thierry Martin qui m'ont invité au séminaire Décision, Probabilité, Incertitude, à Emma Ruttkamp-Bloem qui a supervisé le colloque *New Thinking about Scientific Realism* qui s'est tenu au Cap en août 2014, ainsi qu'à Yafeng Shan, Timothy Lyons et Peter Vickers pour avoir organisé le colloque *Contemporary Scientific Realism and the Challenge from the History of Science* qui s'est tenue à Indianapolis en février 2016. Je remercie enfin l'ensemble de la Société de Philosophie des Sciences, notamment pour l'organisation de son cinquième congrès à Lille en juin 2014.

Je suis reconnaissant à mes collègues doctorantes et doctorants qui, au cours de nombreux séminaires et groupes de discussion, ont fortement contribué à ma formation : Marie Darrason, Max Hardt, Julie Jebeile, Raphaël Künstler, Alberto Naibo, Catherine Koubychkina, Johannes Martens, Gaëlle Pontarotti, Aurélien Tonneau, Youna Tonnerre et David Zarebski. Je remercie Vincent Ardourel, dont la nordique présence a plus d'une fois été d'un secours précieux, Camille Blachère qui a su me faire bénéficier de son regard d'historienne, François Kammerer qui m'a servi de modèle à atteindre et Smaïl Bouaziz qui, par son intelligence, ses compétences, son humour et le don d'un clavier Lenovo a rendu cette thèse possible.

Les amis et collègues ayant accepté de relire cette thèse méritent non seulement ma reconnaissance mais aussi ma compassion. Je remercie donc d'avoir souffert l'orthographe et la syntaxe de mes premiers jets : Roméo Agid, Vincent Ardourel, Jean-Baptiste Bertin (qui a porté encore plus de diligence à sa correction qu'il ne l'aurait fait aux copies de ses élèves), Kévin Buton, Isabelle Drouet (dont la qualité des commentaires m'a beaucoup servi), Antoine Muller (qui a réussi à se passionner pour la théorie de la confirmation malgré son déménagement et ses tâches de jeune père), Lisa Tierny et Frédéric Le Plaine (reine et roi du pétrole). Je tiens particulièrement à remercier Marie Bergounioux, qui règne comme nulle autre sur la grammaire et le style et qui relut un si grand nombre de pages qu'elle en épuisa mon imprimante.

Alors que mes recherches touchent à leur fin, je ne peux m'empêcher d'avoir de fort habituelles mais très sincères pensées pour ma famille qui m'a supporté et aidé de mille manières au cours de ces six années de travail. Je suis très reconnaissant à Colette, ma grand-mère, qui a peut-être plus fait pour cette thèse qu'elle ne l'imagine. Je remercie Nicole et Sébastien, mes parents à la patience et au soutien infinis, Martin, mon frère de sang au courage et à la gentillesse sans pareils et Roméo, mon frère d'élection, parfait paradigme de l'amitié.

Je remercie aussi le gang des Lyonnaises et des Lyonnais d'avoir l'amitié si fidèle : Sophie Bergont, Pauline Clohec, Laurent Gayot et Simon Lahner. Merci également aux femmes et hommes du Nord qui ont dans le cœur ce qui manque au ciel : Vanina et Olivier, pour leurs compétences en cuisine virtuelle,

Éva et Sébastien, qui m'ont offert le calme pendant la tempête et sans qui mes travaux se seraient effondrés avant d'être arrivés à terme. Kévin, Marjorie et Yann m'ont apporté malgré les kilomètres un soutien crucial et constant depuis tant d'années que je ne peux que les remercier d'accepter d'être, encore et toujours, de si proches amis.

Je ne saurais oublier les élèves de lycée à qui j'ai enseigné au cours de trois dernières années : je remercie notamment les TS2 2014-2015 et STMG 2014-2015 du lycée Condorcet de Lens, les STIDD4 2016-2017 et les TL2 2016-2017 du lycée de l'Europe de Dunkerque. Ces classes ont peut-être été le principal frein à la rédaction de cette thèse, mais elles ont aussi été le plus bel entraînement philosophique qui soit en m'apprenant mieux que quiconque à ne pas me payer de mots.

Enfin, j'ai une pensée pour Gladys, renarde qui se tient à l'intersection de tous ces ensembles et qui a été de toutes les péripéties de cette aventure.

Je me rends compte, à ce point, que si la thèse présentée ci-dessous est un résultat personnel dont j'assume seul la responsabilité, les recherches qui y ont mené ont été un travail collectif impliquant un grand nombre de personnes. Il est fort probable qu'à l'heure de les lister j'en ai oublié certaines qui ont pourtant, à un point donné de l'espace-temps, courbé de manière décisive ma ligne d'existence. Je leur prie de m'excuser et de bien vouloir croire que cet oubli n'est dû qu'à la médiocrité de ma mémoire.

*Fait à Lille,
le 28 août 2017.*

Note sur les conventions d'écriture

Cette thèse abordant à plusieurs reprises l'histoire des sciences et de la philosophie, j'ai pris le parti d'indiquer le nom, le prénom, les dates de naissance et de mort des auteurs décédés lors de leur première mention. Après première mention, je n'ai conservé que les noms de ces auteurs. Pour les auteurs vivants, j'ai abrégé le prénom après première mention.

Les dates indiquées dans les références sont, sauf indication contraire, les dates de première publication des ouvrages. Les passages tirés d'ouvrages et articles au titre en anglais ou en allemand ont été traduits par mes soins.

Je suis l'auteur de toutes les figures dont la source n'est pas indiquée.

J'ai emprunté à certaines publications une forme de féminisation de l'orthographe qui consiste, quand cela est possible, à utiliser le féminin comme genre par défaut. C'est ainsi que l'on lira « les chercheuses » plutôt que « les chercheurs » lorsque je fais référence à la communauté scientifique en général. Je suis conscient que de telles conventions ne suffisent bien évidemment pas à résoudre les problèmes de discrimination et de domination que doivent affronter les personnes de genre féminin ou transgenres, mais je tenais à souligner ainsi ma solidarité envers des causes non abordées dans cette thèse.

Sommaire

Introduction générale	1
Sujet de la thèse : l'activité prédictive des sciences empiriques	1
Objectif de la thèse : l'analyse des succès prédictifs et de leur portée	5
Méthode de la thèse : trois niveaux d'analyse de l'activité prédictive	7
Contexte et enjeux de la thèse : le débat sur les nouvelles prédictions	9
Plan de la thèse	18
I La structure des prédictions scientifiques	21
Introduction de la première partie	23
1 Les prédictions guidées par des lois	25
1.1 Les quatre caractéristiques des modèles de loi couvrante .	27
1.2 Les critiques existantes des modèles de loi couvrante . . .	30
1.3 Les modèles de loi couvrante posent-ils des conditions nécessaires pour la structure des prédictions?	34
1.3.1 Les prédictions concernent-elles le futur?	35
1.3.2 Toute prédiction nécessite-t-elle des lois?	38
1.3.3 Peut-on employer plusieurs théories pour réaliser une prédiction?	48
1.3.4 Ne prédit-on que des événements particuliers? . .	53
1.4 Les modèles de loi couvrante posent-ils des conditions suffisantes pour la structure des prédictions?	61
1.4.1 Conditions aux limites et clauses <i>ceteris paribus</i> .	62
1.4.2 Hypothèses auxiliaires et conditions aux limites en cosmologie : le cas de l'effet de Sitter	64
1.4.3 Hypothèses auxiliaires et conditions aux limites en mécanique céleste : le cas du mouvement d'une planète dans un champ gravitationnel newtonien . .	67

1.4.4	Le modèle carnapien des prédictions guidées par des lois	69
1.5	Conclusion du chapitre	72
2	Prédictions guidées par des données et par des modèles	75
2.1	Les controverses sur le pouvoir des sciences naturelles historiques	77
2.1.1	Le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution	77
2.1.2	Le pouvoir prédictif de la géologie	85
2.1.3	Les prédictions dans la méthodologie des sciences naturelles historiques	88
2.2	Études de cas de prédictions guidées par des données et de prédictions guidées par des modèles	91
2.2.1	Prédictions d'événements évolutifs guidées par des données	92
2.2.2	Prédictions géologiques guidées par des modèles	101
2.2.3	Clarifications sur la notion de modèle et conclusion de la section	108
2.3	Prédire et expliquer à partir des <i>Big Data</i>	110
2.3.1	La spécificité des <i>Big Data</i>	111
2.3.2	Les prédictions à partir de données massives et leurs enjeux épistémologiques	115
2.4	Conclusion du chapitre	121
	Conclusion de la première partie : prédire et expliquer	122
II	Les prédictions dans l'histoire de la cosmologie moderne	129
	Introduction de la deuxième partie	131
3	Les prédictions dans la formation de la cosmologie	135
3.1	1917-1929 : la petite industrie mathématique des premiers modèles cosmologiques	138
3.1.1	Les considérations cosmologiques d'Albert Einstein	138
3.1.2	L'Univers imaginaire de Willem de Sitter et les Univers dynamiques d'Alexandre Friedmann	145
3.1.3	L'effet de Sitter et les décalages spectraux vers le rouge avant 1930	149
3.2	1929-1933 : les prédictions des modèles dynamiques d'Univers	154
3.2.1	La prédiction de Lemaître	154
3.2.2	Un cas de sous-détermination prédictive	159
3.2.3	Le succès prédictif des modèles d'Univers dynamiques	163

3.3	Conclusion du chapitre : succès prédictif et changement de paradigme en cosmologie pendant les années 1930	166
3.3.1	Le problème de la maturité scientifique d'une discipline	166
3.3.2	L'acquisition du premier paradigme cosmologique	169
3.3.3	La cosmologie est-elle considérée comme une science mature en 1937?	171
4	Les prédictions et la théorie du big bang	175
4.1	Deux théories et leurs prédictions	177
4.1.1	La théorie de la nucléosynthèse primordiale et ses prédictions	179
4.1.2	La théorie de l'état stationnaire et ses prédictions	182
4.1.3	Pouvoir prédictif et capacité prédictive	185
4.2	Le développement de la capacité prédictive de la cosmologie au cours des années 1950-1960	188
4.2.1	Critiques scientifiques et épistémologiques	188
4.2.2	Le développement de la théorie de l'état stationnaire dans les années 1950	195
4.2.3	Le développement de la théorie du big bang dans les années 1960	200
4.3	Conclusion du chapitre : qui a tué la théorie de l'état stationnaire?	206
4.3.1	Deux hypothèses sur les causes de la mort de la théorie de l'état stationnaire	206
4.3.2	Prédictions robustes et prédictions fécondes . . .	210
4.3.3	La cosmologie est-elle considérée comme une science mature à la fin des années 1960?	216
5	Les prédictions et la théorie de l'inflation	219
5.1	Succès et problèmes du modèle standard de la cosmologie dans les années 1970	220
5.1.1	Le contexte d'apparition du modèle standard de la cosmologie	221
5.1.2	Les problèmes du modèle standard	224
5.2	Le problème du pouvoir prédictif de la théorie de l'inflation dans les années 1980	227
5.2.1	Les premiers développements de la théorie de l'inflation au début des années 1980	227
5.2.2	La théorie de l'inflation a-t-elle un pouvoir prédictif?	233
5.3	Le développement de la capacité prédictive de la théorie de l'inflation dans les années 1990	239
5.3.1	La révolution COBE et la prédiction des anisotropies	239

5.3.2	L'inflation comme théorie des structures	242
5.4	Conclusion du chapitre : le rôle des prédictions dans l'acceptation de la théorie de l'inflation	246
5.4.1	Une révolution achevée?	246
5.4.2	Fécondité <i>versus</i> réfutabilité	248
	Conclusion de la deuxième partie : fécondité et capacité prédictive	253

III Le rôle des prédictions dans le choix des hypothèses 259

	Introduction de la troisième partie	261
--	---	-----

6 Le débat sur le prédictivisme 265

6.1	La naissance du débat sur le prédictivisme au XIX ^e siècle	266
6.1.1	Le débat Whewell-Mill	267
6.1.2	Hypothèses et prédictions dans la philosophie de Whewell	269
6.1.3	Hypothèses et prédictions dans la philosophie de Mill	274
6.1.4	L'héritage de Mill et Whewell dans le prédictivisme de Peirce	279
6.2	Les prédictions dans les théories logiques de la confirmation	285
6.2.1	Keynes et le principe de pureté logique de la confirmation	286
6.2.2	Hempel et le problème de la circularité de la confirmation par les prédictions	289
6.2.3	La nouvelle énigme de l'induction et la théorie de la projection de Goodman	292
6.2.4	Conclusion : la diversité des théories logiques de la confirmation	298
6.3	Les prédictions dans les théories historiques de la confirmation	299
6.3.1	Le prédictivisme paradoxal de Pierre Duhem	300
6.3.2	Les prédictions dans la théorie de la réfutation de Popper	305
6.3.3	Les prédictions dans la méthodologie des programmes de recherche scientifiques de Lakatos	309
6.4	Le fondement du débat actuel sur les prédictions : le problème des preuves déjà connues (<i>old evidence</i>)	313
6.4.1	Le problème des preuves déjà connues dans la méthodologie des programmes de recherche	314
6.4.2	Le problème des preuves déjà connues dans les théories bayésiennes de la confirmation	321
6.5	Conclusion du chapitre	325

7	Capacité prédictive et confirmation	329
7.1	Deux positions intenable : le prédictivisme temporel et le prédictivisme inconditionnel	330
7.1.1	Retour sur le prédictivisme temporel	331
7.1.2	Le cas Mendeleïev et la redéfinition des prédictions heuristiques	335
7.1.3	Le prédictivisme heuristique inconditionnel et ses contre-exemples	339
7.2	La position dominante : le prédictivisme conditionnel faible	347
7.2.1	L'argument de la tricherie	347
7.2.2	Le risque d'ajustement forcé et le critère d'information d'Akaike	351
7.2.3	Le prédictivisme faible	357
7.3	Les limites <i>pratiques</i> du prédictivisme conditionnel . . .	358
7.3.1	Prédictions de faits d'un même genre et prédictions de faits d'un genre nouveau	359
7.3.2	Les différents niveaux de l'activité scientifique et les prédictions	361
7.4	Les limites <i>conceptuelles</i> du prédictivisme faible	365
7.4.1	L'ambiguïté du prédictivisme faible	365
7.4.2	La capacité prédictive des théories comme compromis entre vertus épistémiques	367
7.4.3	L'opacité des vertus épistémiques	370
7.5	Le rôle des prédictions fécondes dans le choix des hypothèses	375
7.5.1	Capacité prédictive et fécondité	375
7.5.2	Réponse au problème du chapitre	377
7.5.3	Un succès prédictif paradoxal : la prédiction du retour de la comète de Halley par Clairaut	379
7.5.4	Un échec prédictif paradoxal : les prédictions anthropiques	383
7.6	Conclusion du chapitre : le rôle des prédictions dans la théorie de la confirmation	390
	Conclusion de la troisième partie : choix des hypothèses et changement scientifique	393
IV	Nouvelles prédictions et réalisme scientifique	395
	Introduction de la quatrième partie : le problème de la vérité des théories scientifiques	397
8	L'argument du miracle fondé sur les succès prédictifs	399
8.1	Trois origines et versions de l'argument du miracle	401

8.1.1	Whewell : l'argument du miracle comme inférence à la seule explication	402
8.1.2	Poincaré : l'argument du miracle comme argument d'indispensabilité	403
8.1.3	Duhem : l'argument du miracle comme intuition	408
8.2	L'inférence à la meilleure explication et le dilemme du réaliste	412
8.2.1	Quels succès prédictifs doivent être expliqués par la vérité?	412
8.2.2	Les définitions contraignantes des nouvelles prédictions	418
8.2.3	Le problème des idéalizations	422
8.2.4	La stratégie de la désidérialisation et ses limites	427
8.2.5	Le dilemme des réalistes	431
8.3	Le réalisme sélectif et le problème de la sous-détermination prédictive	433
8.3.1	La stratégie du réalisme sélectif	434
8.3.2	Les deux dérivations de la prédiction du point lumineux	436
8.3.3	À la racine de la sous-détermination prédictive	444
8.3.4	La portée de l'argument du miracle	447
8.4	Le réalisme prospectif et l'imprédictibilité de la science	450
8.4.1	La témérité du réalisme prospectif	452
8.4.2	Prédictions fécondes et avenir de la science	453
8.4.3	Une histoire des sciences prédictive est-elle possible?	455
8.4.4	Le prospectivisme négatif de P. Vickers	457
8.4.5	L'avenir de la science : une affaire de scientifiques	460
8.5	Conclusion du chapitre	462
9	Expérimentation et prédiction	465
9.1	L'argument expérimental en faveur du réalisme des entités	466
9.1.1	L'argument de I. Hacking	466
9.1.2	Les problèmes de l'argument expérimental	473
9.1.3	L'argument d'A. Chakravartty et ses limites	476
9.2	Le rôle des prédictions dans les pratiques expérimentales	480
9.2.1	Un exemple d'énoncé prédictif	480
9.2.2	Les énoncés prédictifs comme protocoles d'intervention expérimentale	484
9.2.3	Prédire et expérimenter au-delà du système solaire	489
9.3	L'argument en faveur du réalisme fondé sur les prédictions techniques	495
9.3.1	Reformulation de l'argument expérimental	495

9.3.2	La prédiction du point lumineux	499
9.3.3	La prédiction des ondes gravitationnelles	502
9.4	Conclusion : prédiction et objectivité	507
	Conclusion du chapitre : un réalisme sans métaphysique	512
Conclusion générale		521
	La place des prédictions dans l'activité scientifique	521
	La pluralité des usages et des fonctions de l'activité prédictive	522
	Le problème de la portée des succès prédictifs	525
	La fécondité et l'influence des succès prédictifs sur l'évolution des sciences	526
	Le rôle et la valeur des tests prédictifs	528
	Les limites de la portée des succès prédictifs	531
	Les prédictions techniques et les valeurs de la science	534
V	Annexes	539
	English summary of the dissertation	541
	Introduction	541
	Part 1 : the structure of scientific predictions	544
	Chapter 1: law-driven predictions and covering law models	544
	Chapter 2: data-driven and model-driven predictions in natural historical sciences	546
	Part 2 : predictions in the history of modern cosmology	548
	Chapter 3: the role of predictions in the birth of modern cosmology (1917-1939)	548
	Chapter 4: predictions and the Big Bang theory (1948-1970)	550
	Chapter 5: predictions and the theory of inflation since 1970	552
	Part 3 : the role of predictions in the choice of hypotheses	553
	Chapter 6: the debate on predictivism	554
	Chapter 7: predictive capacity and confirmation	556
	Part 4 : novel predictions and scientific realism	558
	Chapter 8: the no miracle argument based on novel pre- dictions and its problems	558
	Chapter 9: prediction and experimentation	560
	Conclusion	562
	Annexe au chapitre 1	565
	Annexe au chapitre 2	571
	Le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution	571

La controverse sur la testabilité et la scientificité de la théorie de l'évolution	574
Annexe au chapitre 3	577
Des équations d'Einstein à l'équation de Friedmann-Lemaître .	577
L'effet de Sitter	579
La prédiction de Lemaître	580
Le modèle Einstein-de Sitter	580
Annexe au chapitre 4	583
Les deux formulations de la théorie de l'état stationnaire . . .	583
Les tests de la théorie de l'état stationnaire	589
Annexe au chapitre 5	597
Les énigmes du modèle standard	597
La théorie de l'inflation et les énigmes du modèle standard . .	599
La théorie de l'inflation et la formation des structures	600
Annexe au chapitre 6	607
La démonstration de C. Howson et P. Urbach	607
Le problème des alternatives non conçues	609
Annexe au chapitre 7	615
La précision prédictive	616
La diversité des preuves	617
Le problème de Duhem	619
La diversité prédictive	621
Annexe au chapitre 8	623
Index rerum	625
Index nominum	629
Bibliographie	631

Introduction générale

Sujet de la thèse : l'activité prédictive des sciences empiriques

L'activité prédictive a été magique bien avant d'être scientifique : aruspices, oracles, astrologues, devins et prophètes ont précédé les savants et les chercheuses dans leurs tentatives pour estimer le cours des événements à venir. Les prédictions scientifiques qui sont l'objet de cette thèse ne forment qu'un petit contingent parmi tous les efforts d'anticipation du futur. Il ne s'agit donc pas de décrire toutes les formes que l'activité prédictive a revêtu au cours des âges, mais uniquement les prédictions, lorsqu'elles réussissent, sont considérées comme des succès des sciences empiriques.

Comment distinguer ces prédictions scientifiques des autres formes de prédictions ?

Même si l'on estime qu'il n'est pas possible de tracer une frontière nette et fixe entre les prédictions d'une astronome, par exemple, et celles de l'oracle de Delphes, et qu'il n'existe qu'un air de famille entre les différentes méthodes utilisées par les scientifiques pour réaliser des prédictions, cet air de famille est suffisant pour les distinguer des techniques de divinations magiques.

La légende veut que lorsque l'oracle de Delphes prédit au poète Eschyle (-526--456) qu'il mourrait écrasé par une maison, celui-ci s'exila loin des villes, mais que cela ne l'empêcha d'être tué par la carapace d'une tortue lâchée par un aigle, accomplissant malgré lui la prophétie de l'oracle. Or, même un scientifique idéal n'aurait jamais pu prédire

ainsi la mort d'Eschyle et ses circonstances.

En effet, la prédiction de l'oracle est une *prophétie*, c'est-à-dire qu'elle est *absolue* : elle n'a d'autre origine que la volonté des dieux et doit s'accomplir quelles que soient les conditions dans lesquelles se trouve le malheureux Eschyle. Les prédictions que l'on trouve dans les revues spécialisées, les rapports d'experts et les ouvrages scientifiques sont au contraire *conditionnelles* : elles énoncent ce qui se passera pour un système donné, si certaines conditions sont réunies et si notre connaissance du comportement de ce système est correcte.

Cette différence entre prophéties et prédictions conditionnelles reflète une différence dans la manière dont oracles et scientifiques produisent leurs prédictions. Tirésias, le devin de la mythologie grecque, devient aveugle après avoir été puni par une déesse, Héra ou Athéna selon les versions. Mais cette cécité a une autre signification : elle indique qu'il n'est ni maître, ni responsable — ni même conscient ! — du procédé qui lui permet de voir l'avenir. En effet, un oracle reçoit sa connaissance du futur des dieux, des astres, des entrailles des animaux ou de tout autre source qu'il est le seul à pouvoir contacter ou à pouvoir interpréter : mais il reste tout aussi aveugle sur les raisons qui font que cette prédiction se réalise que ceux à qui il l'annonce.

Alors que le processus par lequel l'oracle arrive à sa prédiction est opaque, mystérieux et rétif à toute vérification, le processus par lequel une scientifique réalise sa prédiction doit être transparent et public, car il est aussi important, voire plus, que son résultat lui-même. Une scientifique peut produire une prédiction de nombreuses manières différentes, mais toujours en suivant une série d'inférences qui peut être communiquée et examinée par d'autres membres de la communauté scientifique — sinon on est en droit de lui demander la méthodologie qu'elle a employée pour obtenir un tel résultat.

Le terme de « prédiction » recouvre donc un concept à texture ouverte, c'est-à-dire qui a évolué avec le temps et les pratiques (et nous verrons à plusieurs reprises ces évolutions dans la première partie de cette thèse) mais cela n'empêche pas de démarquer les prédictions scientifiques des divinations magiques, à condition de bien distinguer la prédiction comme

énoncé, qui est une proposition à laquelle aboutit un processus prédictif, de la prédiction comme *activité*, qui est l'ensemble des pratiques impliquées dans la production de cet énoncé. Dans cette thèse, je parlerai donc d'*activité prédictive* ou de *raisonnement prédictif* pour désigner l'activité menant à formuler des *énoncés prédictifs*, terme désignant la conclusion des raisonnements qui constituent cette activité.

Cette thèse ne se focalise donc pas uniquement sur les prédictions comme ensemble d'énoncés portant sur le futur comme d'autres ouvrages¹ mais aussi et surtout sur la prédiction comme forme spécifique de l'activité scientifique (qui, comme on le montre plus loin, ne regarde pas forcément que vers l'avenir).

Une fois cette distinction faite, on peut caractériser plus précisément l'activité prédictive propre aux sciences empiriques. Elle ne peut fonctionner que si l'on décrit un système en fonction d'un certain nombre de variables et que l'on sait, sur la base d'expériences passées ou de théories considérées comme valides, comment ces variables sont corrélées les unes aux autres. Si une scientifique ne peut prédire, à la seule vue d'Eschyle, comment celui-ci va rendre l'âme, c'est que rien ne lui permet de relier les informations dont elle dispose à sa mort. En revanche, si elle observe un aigle lâchant une carapace au-dessus du poète, elle est capable, à partir de la position de l'aigle, d'Eschyle et des théories physiques et biologiques à sa disposition, de déterminer la vitesse de la chute de la carapace, l'énergie dégagée lors de son impact sur le crâne d'Eschyle et ainsi la gravité de la blessure infligée.

Autrement dit, dans un contexte scientifique, *prédire c'est être capable de déterminer la ou les valeur(s) d'une (ou plusieurs) variable sans l'observer ni la mesurer directement, mais en la corrélant à d'autres variables*.

Cette définition affirme que prédire, c'est rechercher les bénéfices de la mesure ou de l'observation, mais par des inférences vérifiables publiquement. Un *succès prédictif* consiste à trouver par la mesure ou l'observation la même valeur d'une variable que celle à laquelle on aboutit par

¹Par exemple Nicholas RESCHER, *Predicting the Future : An Introduction to the Theory of Forecasting*, New York, State University of New York Press, 1998.

un raisonnement prédictif. Cette définition implique donc que les succès prédictifs sont le domaine des *sciences empiriques*, c'est-à-dire les disciplines scientifiques qui ont des pratiques d'observation ou d'expérimentation par opposition aux sciences formelles comme les mathématiques ou la logique et qui peuvent voir leurs prédictions testées par la mesure ou l'observation².

Mais la définition des prédictions adoptée ici ne présuppose pas qu'une prédiction décrive l'avenir. On a tendance à réserver le terme « prédiction » pour les phénomènes futurs parce que la valeur qu'adoptera une variable dans l'avenir ne peut pas, dans la plupart des cas, être mesurée directement et doit ainsi être fixée autrement que par la mesure ou l'observation. Mais il existe de nombreux autres cas de figure où l'on ajuste une variable sans la mesurer. Qu'un énoncé décrive l'avenir n'est donc pas une condition *nécessaire* pour qu'il soit qualifié de prédiction et, comme on le montre dans la première partie de cette thèse consacrée à la structure logique des raisonnements prédictifs, ce n'est pas non plus une condition *suffisante*.

De plus, cette définition inclut pareillement prédictions quantitatives et qualitatives, puisque les valeurs d'une variable peuvent aussi bien être des grandeurs représentées par des nombres, comme la vitesse de chute d'une carapace de tortue, que des états représentés par des mots, comme l'état de santé d'Eschyle.

Enfin, cette définition ne fait pas référence à une manière spécifique de réaliser des prédictions — en utilisant par exemple des inférences déductives ou inductives — ni à des éléments nécessaires à leur production — comme des lois, des théories, des modèles ou des mécanismes. En effet, ces termes posent de nombreux problèmes de définition qui risqueraient de nous engager dans une longue et complexe régression avant d'aborder l'analyse de l'activité prédictive elle-même. Cependant, même si l'on ne se prononce pas pour l'instant sur le sens à donner à ces termes, on dira que s'il est possible d'utiliser une connaissance scientifique — que ce soit une théorie, une hypothèse, une loi, un modèle, une base de donnée,

²L'appellation *sciences empiriques* a l'avantage de rester agnostique quant à savoir s'il existe une différence d'objet ou de méthode entre des sciences de la *nature* et des sciences *humaines*.

etc. — pour réaliser *au moins une* prédiction, alors cette connaissance a un *pouvoir prédictif*. Si l'on cherche à *évaluer* le pouvoir prédictif d'une connaissance, on dira que plus ces prédictions sont nombreuses, variées et précises, plus sa *capacité prédictive* est importante.

Même si ces définitions permettent de distinguer les prédictions scientifiques des prophéties, elles restent suffisamment larges pour accepter tous les usages que les scientifiques font du terme « prédiction ». Or, l'un des problèmes centraux des analyses des prédictions scientifiques est de passer sous silence la pluralité des raisonnements prédictifs employés par les scientifiques. L'objectif de cette thèse est de combler les lacunes de ces analyses et d'examiner les différentes formes de prédictions pour comprendre en quoi consistent les succès prédictifs.

Objectif de la thèse : l'analyse des succès prédictifs et de leur portée

Si l'activité prédictive des sciences empiriques est philosophiquement importante, c'est qu'elle représente un succès impressionnant, apparemment indéniable et évident. Thalès (-625- -547) est célébré par Diogène Laërce (180-240) dans les *Vies, doctrine et sentences des philosophes illustres* pour avoir été le premier à prédire une éclipse de Soleil en -585 avant notre ère et par Aristote (-348- -322) qui mentionne dans *La Politique* [1259a] qu'il fit fortune en prédisant, grâce à « ses connaissances en astronomie », un été chaud et une importante récolte d'olives. Peu importe que ces anecdotes relèvent de la légende ou de la vérité historique : elles révèlent que, dès l'antiquité, la réussite de prédictions scientifiques pouvait être portée comme un titre de gloire, non seulement parce qu'elle semble manifester une connaissance de l'ordre du monde mais aussi parce qu'elle permet d'utiliser cette connaissance pour en tirer profit.

Bien souvent encore, lorsqu'il s'agit d'offrir des preuves évidentes de la valeur de la science, ce sont les succès prédictifs qui viennent en premier à l'esprit : comment pourrait-on douter de la théorie de la gravitation de Newton alors qu'elle nous a mené à découvrir la planète Neptune et qu'on l'utilise couramment pour mettre des satellites artificiels en orbite ?

Et pourtant, il reste quelque chose, sinon de magique, du moins de paradoxal, dans les succès de l'activité prédictive : il arrive et il arrive même souvent, qu'une prédiction soit testée et vérifiée alors même qu'elle a été dérivée d'hypothèses qui ne semblent correspondre à rien de réel, voire contredire explicitement la réalité telle que nous la concevons. Autrement dit, comment se fait-il que des prédictions scientifiques tombent juste alors même qu'elles reposent sur des fondements faux ou fictionnels ? Les éphémérides des planètes du système solaire, par exemple, supposent que les planètes sont des masses ponctuelles et la prédiction de l'expansion de l'univers repose sur le postulat que celui-ci est homogène et isotrope : ces hypothèses simplifient et déforment la réalité telle qu'on la connaît et pourtant elles n'empêchent pas les calculs des astronomes et des cosmologistes de tomber juste. De plus, de nombreuses théories passées ont connu d'éclatants succès prédictifs alors même qu'elles sont considérées aujourd'hui comme des descriptions inadéquates de la réalité. Nous savons par exemple que les atomes d'hydrogène ne correspondent pas réellement au modèle de Niels Bohr (1885-1962) — un noyau chargé positivement entouré d'orbites électroniques quantifiées — et pourtant celui-ci permet de prédire simplement et précisément les raies spectrales de l'hydrogène. De même, la théorie de la gravitation de Newton, dont nous célébrions les succès quelques paragraphes plus haut, n'est plus considérée comme vraie depuis qu'elle a été remplacée par celle d'Einstein au début du XX^e siècle, mais ces succès n'en semblent pas moins éclatants pour autant.

Les succès de l'activité prédictive des sciences empiriques sont donc impressionnants mais semblent pouvoir être tirés du faux comme du vrai. C'est pourquoi cette thèse cherche à examiner ces succès et la portée que l'on peut leur conférer :

- En quoi consistent les succès prédictifs des sciences empiriques ?
- Comment ces succès sont-ils obtenus ?
- Quelle est leur portée, c'est-à-dire jusqu'où peut-on accorder notre confiance à une pratique ou une hypothèse scientifique qui peut s'enorgueillir de tels succès ?

C'est surtout cette dernière question qui fait actuellement débat en philosophie des sciences et c'est l'analyse de la portée des succès prédictifs qui organise les arguments de cette thèse.

Méthode de la thèse : trois niveaux d'analyse de l'activité prédictive

On peut donner à la portée des succès scientifiques trois dimensions qui correspondent à trois niveaux d'analyse différents de l'activité prédictive :

- La première caractéristique des prédictions réussies est d'impressionner : la question est alors de savoir en quoi elles influencent les scientifiques dans *l'évolution des pratiques et des connaissances scientifiques*.
- Un succès prédictif pourrait être impressionnant et influencer la communauté scientifique mais n'avoir aucune valeur de preuve, de même que les quelques succès d'un médium ne représentent pas une preuve de ses prétendues capacités extrasensorielles. Il faut donc se demander à quelles conditions les succès prédictifs *confirment* ou *corroborent* réellement une hypothèse, c'est-à-dire peuvent légitimement constituer une raison d'accepter une hypothèse, une théorie ou un modèle.
- Enfin, on peut aller plus loin encore et se demander si certains succès prédictifs nous assurent que les hypothèses dont ils sont dérivés sont *vraies* et *définitives*. Il s'agit donc d'examiner si l'on peut faire des succès de l'activité prédictive un argument en faveur du *réalisme scientifique*, thèse selon laquelle la connaissance scientifique vise et réussit parfois à décrire adéquatement la réalité.

Évaluer la portée des succès prédictifs demande donc de traiter des problèmes à trois niveaux différents :

- *L'histoire des sciences* : les succès prédictifs ont-ils déterminé, dans le passé, l'acceptation de nouvelles hypothèses par les communautés scientifiques ? Quel(s) type(s) de prédictions réussies ont joué

un rôle crucial dans l'évolution des connaissances scientifiques et pourquoi ?

- *La théorie de la confirmation* : quelles prédictions sont des preuves fondées à déterminer le choix des hypothèses ? Peut-on considérer qu'une hypothèse qui a réussi à prédire un phénomène est mieux confirmée qu'une hypothèse formulée après coup pour rendre compte de ce phénomène ?
- *La métaphysique des sciences* : y a-t-il des prédictions qui représentent de tels succès que l'on ne peut les expliquer que si les hypothèses qui ont permis de les dériver sont vraies ou approximativement vraies ? Les constituants nécessaires à ces prédictions peuvent-ils dépeindre une image scientifique du monde considérée comme vraie ?

La thèse que je soutiens est que ces trois niveaux de problèmes sont liés et ne peuvent ni ne doivent être étudiés séparément. En effet, comme je le montre dans la première partie de cette thèse, il n'existe pas *une seule et unique* structure logique des raisonnements prédictifs qui permettrait d'identifier des conditions nécessaires et suffisantes pour définir les prédictions scientifiques et de considérer tous les succès prédictifs comme identiques. Il est donc nécessaire d'examiner si ce sont bien les mêmes succès prédictifs qui jouent un rôle dans l'évolution historique des sciences, dans la confirmation des hypothèses et dans les débats sur le réalisme scientifique. S'il s'avérait que ce n'est pas le cas, cela signifierait non seulement que les succès de l'activité prédictive auxquels les scientifiques attachent de l'importance n'ont pas réellement valeur de preuve, que leur influence est purement psychologique et infondée, mais aussi que les succès prédictifs utilisés pour sélectionner les hypothèses ne permettent pas de s'assurer que celles-ci convergent vers une description vraie de la réalité, ce qui est une thèse essentielle du réalisme scientifique.

Il est ainsi nécessaire d'examiner les succès prédictifs à ces trois niveaux d'analyse pour étudier la cohérence et la portée de l'activité prédictive des sciences empiriques. Pour mener à bien cet examen, il faut donc concilier différentes approches de l'activité scientifique :

-
- une approche *logique* de la science pour analyser les structures des raisonnements prédictifs et mettre en lumière leur pluralité ;
 - une approche *historique* de l'évolution des connaissances et des pratiques scientifiques, sans se limiter à quelques épisodes de prédictions réussies à des fins d'illustration, pour étudier au plus près l'activité concrète des scientifiques sur un temps long et évaluer l'effectivité réelle des succès prédictifs ;
 - une approche du *choix des hypothèses* fondée sur les théories de la confirmation et de la corroboration, pour examiner quels succès prédictifs constituent des preuves et le poids de ces preuves dans l'acceptation de nouvelles hypothèses ;
 - une approche *métaphysique* de la science, pour étudier à quoi nous engageant ontologiquement les succès de l'activité prédictive.

La combinaison de ces différents styles épistémologiques est requise par le sujet même de cette thèse, les prédictions scientifiques, qui sont à la fois une pratique concrète dont les scientifiques sont les acteurs, un critère que ceux-ci utilisent eux-mêmes pour évaluer les succès et les échecs de leurs programmes de recherches et un objet de spéculations philosophiques. Ces aspects ne peuvent être désolidarisés, comme le montre le problème philosophique où le rôle des succès prédictifs est aujourd'hui le plus débattu : celui du réalisme scientifique.

Contexte et enjeux de la thèse : le débat sur les nouvelles prédictions

L'étude de l'activité prédictive et de ses succès est en effet d'autant plus urgente aujourd'hui que la notion de nouvelles prédictions est, depuis trois décennies, au cœur d'une des principales controverses de philosophie des sciences : l'opposition entre antiréalisme et réalisme scientifique. Le réalisme scientifique est une famille de positions philosophiques qui ont toutes en commun de soutenir que la connaissance scientifique est *vraie*, ou du moins qu'elle vise à l'être, au sens où elle reflète la réalité

de la nature telle qu'elle existe indépendamment de nos perceptions ou théories. Les anti-réalistes partagent la thèse selon laquelle la science ne peut et/ou ne doit pas viser à décrire une telle réalité.

Le principal argument en faveur du réalisme scientifique est connu sous le nom d'argument du miracle, en référence à l'affirmation d'Hilary Putnam (1926-2016) selon laquelle « le réalisme scientifique [serait] la seule philosophie qui ne fait pas du succès de la science un miracle »³.

L'argument semble simple et intuitif : il repose sur l'apparente évidence que si nous arrivons à construire des théories qui s'appliquent particulièrement bien aux données empiriques, qui sont confirmées par de nombreux tests et utilisées pour mettre au point de nouvelles technologies efficaces, alors il n'y a qu'une infime probabilité que les postulats que font ces théories sur la nature de la réalité (sur ses entités fondamentales ou sur les lois qui les régissent) ne soient pas vraies (ou du moins approximativement vraies). S'il s'agissait uniquement de fictions, il faudrait une « coïncidence cosmique »⁴ infiniment peu probable, pour qu'elles s'appliquent si bien à l'expérience.

Pourtant cet argument est difficile à soutenir car l'intuition sur laquelle il repose nous échappe dès que l'on essaye de la formuler précisément. De quel type de succès scientifique parle-t-on et pourquoi serait-il si inexplicable sans faire appel à la thèse du réalisme scientifique ?

Le succès scientifique peut en effet prendre de nombreuses formes et même s'il peut nous sembler que les sciences empiriques modernes ont rencontré de nombreux succès, nous sommes un peu dépourvus lorsqu'il s'agit de fournir un ou plusieurs critères nécessaires et suffisants pour identifier un succès scientifique. Ce qui compte comme un succès varie selon les disciplines scientifiques et les époques et ce qui a pu apparaître comme un succès pour Claude Ptolémée (100-168) — arriver à décrire tous les mouvements des astres par des compositions de mouvements circulaires uniformes — est aujourd'hui conçu comme un système *ad hoc* empêtré dans sa complexité. Le fait qu'il n'existe actuellement

³Hilary PUTNAM, *Philosophical Papers : Mathematics, Matter and Method*, Cambridge, Cambridge University Press, 1975, p. 73.

⁴John SMART, *Philosophy and Scientific Realism*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963.

pas de consensus pour démarquer les disciplines scientifiques des disciplines non-scientifiques et pseudo-scientifiques, est la meilleure preuve du fait que nous ne disposons pas d'un tel critère pour définir le succès scientifique : il suffirait en effet de l'appliquer pour déterminer quelles recherches rencontrent suffisamment de succès pour être appelées scientifiques et lesquelles peuvent être reléguées au rang de pseudo-sciences.

Cependant, si nous ne disposons pas de critères nécessaires et suffisants du succès scientifique, nous disposons sûrement de critères *suffisants*, puisque certains épisodes de l'histoire des sciences apparaissent indéniablement comme des réussites, comme la précision des lois de Kepler (1571-1630), l'explication de l'adaptation des espèces à leur environnement par la théorie de la sélection naturelle de Darwin (1809-1882), la prédiction de l'existence d'éléments chimiques inconnus par Dmitri Mendeleïev (1834-1907) ou l'unification des théories électriques et magnétiques par James Maxwell (1831-1879).

Parmi ces succès, lesquels sont si impressionnants qu'ils ne pourraient s'expliquer que si les théories qui en sont responsables sont vraies ou approximativement vraies ?

Puisqu'il est ici question des sciences empiriques, le type de succès le plus évident est l'accord avec les données expérimentales : l'adéquation empirique. Reste à déterminer ce que l'on entend par là.

Si l'adéquation empirique ne désigne que le fait que la théorie soit compatible avec les données existantes, l'objection principale que l'on peut faire est qu'il a existé un grand nombre de théories passées qui rendaient ainsi compte d'un ensemble très varié de phénomènes et qui étaient considérées comme confirmées, mais qui ne sont plus aujourd'hui qualifiées de vraies au sens où l'on ne considère plus qu'elles décrivent les entités et les processus réellement à l'œuvre dans la nature. Un des grands apports de l'histoire des sciences depuis les années 1960 est d'avoir replacé les théories scientifiques passées dans leur contexte afin de montrer leur cohérence interne et leur efficacité à rendre compte des données disponibles à l'époque de leur développement. Larry Laudan a donné de nombreux exemples de telles théories passées qui étaient empiriquement adéquates mais qui ont été par la suite rejetées :

- La théorie des orbes cristallines de l'astronomie antique et médiévale.
- La théorie des humeurs en médecine.
- La géologie « catastrophiste » et la théorie d'un déluge universel.
- La théorie chimique du phlogistique.
- La théorie de la chaleur reposant sur l'hypothèse du calorique.
- La théorie vibratoire de la chaleur.
- Les théories des forces vitales en physiologie.
- La théorie de l'éther optique.
- La théorie de l'inertie circulaire.

D'après L. Laudan, on pourrait allonger cette liste « *ad nauseam* »⁵ et développer ce que l'on appelle désormais l'« *induction pessimiste* » : puisque la plupart de nos théories passées fortement confirmées se sont révélées fausses il y a une forte probabilité que nos théories actuelles se révèlent fausses à leur tour.

Il est donc impossible de séparer la question du réalisme scientifique de l'histoire des sciences et de la théorie de la confirmation, à moins d'admettre la conséquence absurde que des images scientifiques du monde successives et incompatibles sont toutes aussi vraies les unes que les autres.

Face à l'objection de l'induction pessimiste, les philosophes réalistes se mirent en quête d'un autre type d'adéquation empirique plus restrictive que la simple correspondance entre un certain nombre d'énoncés théoriques et de résultats expérimentaux, c'est-à-dire une autre forme de succès empirique qui permettrait de cerner l'ensemble des théories scientifiques dignes de foi. Le fait qu'une théorie soit à même d'expliquer de nombreux phénomènes semble représenter un succès dans tous les champs de l'activité scientifique. Cependant la notion d'explication

⁵Larry LAUDAN, "A Confutation of Convergent Realism", *Philosophy of Science* 48.1 (1981), p. 19-49, p. 33.

est dépendante de l'époque et de la discipline dans laquelle elle est employée : ce qui constituait une bonne explication pour Ptolémée ne l'était plus, par exemple, pour Johannes Kepler. La notion d'explication faisant débat depuis plusieurs décennies – si ce n'est plusieurs siècles – parmi les philosophes des sciences, les succès explicatifs ne semblent pas suffisant pour soutenir l'argument du miracle et ont été progressivement éliminés du débat sur le réalisme scientifique⁶.

C'est pourquoi, à partir de la fin des années 1980, les réalistes ont reformulé l'argument du miracle en l'appuyant sur la notion de succès prédictif plutôt que sur celle de succès explicatif, considérant que ce type de succès est suffisant, sinon nécessaire, pour qu'une théorie soit confirmée empiriquement et que la plupart des théories passées aujourd'hui rejetées comme fausses n'ont pas connu de succès prédictifs. John Worrall⁷ et Alan Musgrave⁸ notamment, ont caractérisé ce type de succès en s'inspirant des arguments d'Henri Poincaré⁹ (1854-1912) et de Pierre Duhem¹⁰ (1861-1916) : si les théories sont choisies en fonction de leur capacité à réaliser des nouvelles prédictions¹¹, c'est-à-dire les prédictions de phénomènes d'un genre nouveau par rapport à ceux qu'une théorie est destinée à expliquer, alors cette capacité est inexplicable si les hypothèses de ces théories ne sont pas vraies ou partiellement vraies, donc les succès prédictifs indiquent quelles théories sont dignes de foi. L'objectif de cette stratégie est de prouver qu'aucune des théories confirmées par des succès

⁶Sur ce point, voir Juha SAATSI, “Historical Inductions, Old and New”, *Synthese* (2017), publication en ligne.

⁷John WORRALL, “Structural Realism : The Best of Both Worlds?”, *Dialectica* 43.2 (1989), p. 99–124.

⁸Alan MUSGRAVE, “The Ultimate argument for scientific realism”, *Relativism and realism in science*, sous la dir. de Robert NOLA, Dordrecht, Springer, 1988, p. 229–252.

⁹Henri POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, Paris, Champs-Flammarion, 1902.

¹⁰Dans son ouvrage *La Théorie physique, son objet, sa structure* (1914), qui a exercé une influence constante sur les épistémologues tout au long du XX^e siècle, Duhem considère que nous ne pouvons nous empêcher, comme par un « acte de foi », de croire qu'une théorie est une « classification naturelle » de lois empiriques, lorsqu'elle « prophétise le résultat d'une expérience scientifique avant qu'elle n'ait été réalisée. » Pierre DUHEM, *La Théorie physique : son objet, sa structure*, 2e édition (1914), Paris, Vrin, 1906, p. 37. Les conceptions de Duhem et de Poincaré sont étudiées en détail dans les troisième et quatrième parties de cette thèse.

¹¹Je traduis ainsi l'expression *novel predictions* qui a acquis un sens précis et technique analysé dans le chapitre 8.

prédicatifs ne fait partie de la liste de l'induction pessimiste de L. Laudan et donc que celle-ci ne constitue pas une objection à l'argument du miracle s'il est fondé sur les succès prédictifs.

Ainsi, l'immense majorité des conceptions du réalisme scientifique développées depuis vingt ans¹² définissent ainsi principalement le succès des sciences empiriques comme un succès prédictif et c'est cette forme de succès qui leur permet d'identifier les théories dites « matures » qui échappent à l'induction pessimiste de L. Laudan et peuvent prétendre à la vérité.

Cependant, cette utilisation des succès prédictifs soulève un nouveau problème, qui vient cette fois-ci de la théorie de la confirmation : pour quelle raison devrait-on considérer qu'une théorie est confirmée par ses succès prédictifs ? John Stuart Mill (1806-1873) et John Maynard Keynes (1883-1946) notamment, ont développé des arguments (sur lesquels on revient dans la troisième partie de cette thèse) pour prouver qu'il n'y a aucune raison de donner un poids spécifique aux prédictions réussies dans le choix des hypothèses. En effet, si un tel choix est rationnel et fondé uniquement sur les relations logiques entre les données empiriques et les hypothèses, en quoi le fait qu'un phénomène ait été observé avant ou après la formulation d'une hypothèse pourrait-il l'influencer ? L'ordre chronologique des découvertes n'a pas valeur de preuve si l'on soutient que la confirmation d'une hypothèse n'est affaire que de rapports formels et atemporels entre hypothèses et données empiriques.

Les philosophes réalistes qui donnent aux succès prédictifs une portée telle qu'ils permettent de discriminer entre vraies et fausses théories doivent donc répondre à ces objections et soutenir une position *prédictiviste* concernant le choix des hypothèses, c'est-à-dire une conception qui donne aux prédictions une place spécifique dans la confirmation ou la corroboration des théories.

¹²Parmi lesquelles on trouve les ouvrages suivants qui sont discutés dans cette thèse : Jarrett LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, Oxford, Oxford University Press, 1997, Stathis PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, Londres, Routledge, 1999, Anjan CHAKRAVARTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007, James LADYMAN et Don ROSS, *Every Thing Must Go : Metaphysics Naturalized*, Oxford, Oxford University Press, 2009.

Mais, à nouveau, c'est l'analyse historique de l'activité prédictive qui montre les limites de ces positions et les pousse à évoluer. Certaines théories confirmées et considérées comme vraies, comme la théorie de l'évolution de Darwin, ne semblent avoir été confirmées que par des phénomènes déjà connus et non par des prédictions. Doit-on considérer qu'elles sont dénuées de capacité prédictive ou revoir la définition de ce qui compte comme une nouvelle prédiction ? À l'inverse, certaines théories comme l'optique ondulatoire de Fresnel, qui décrit la lumière comme la vibration d'un milieu élastique au repos absolu (l'éther optique), s'appuient sur des images scientifiques du monde aujourd'hui rejetées et ont pourtant mené à d'éclatants succès prédictifs.

Ainsi, la plupart des philosophies réalistes ont été amené à se repositionner et à développer de nouveaux arguments : les théories scientifiques ne seraient pas *totalemment et parfaitement* vraies mais seulement *approximativement* ou *partiellement* vraies, en ce sens que seuls *certaines* de leurs postulats décrivent la nature telle qu'elle existe réellement. La question devient alors de savoir comment déterminer lesquels de ces postulats sont vrais et s'ils ne disparaissent pas lorsqu'une nouvelle théorie voit le jour et élimine celle à laquelle ils appartiennent.

La procédure la plus connue et la plus discutée pour déterminer quels sont les postulats théoriques dignes de foi est celle proposée par Stathis Psillos¹³ sous l'appellation de stratégie *divide et impera* (« diviser pour régner ») : S. Psillos considère qu'il faut examiner quelles hypothèses jouent un rôle crucial dans la dérivation des succès prédictifs d'une théorie et vérifier qu'elles sont retenues dans les théories postérieures, assurant une continuité entre théories du même domaine par-delà les révolutions scientifiques.

Ainsi, ces récents développements dans le débat sur le réalisme scientifique donnent aux nouvelles prédictions une importance sans précédent. Non seulement les succès prédictifs sont utilisés pour déterminer quelles théories sont approximativement ou partiellement vraies, mais aussi quels aspects de ces théories sont dignes de foi et constituent un progrès scientifique. Autrement dit, les succès prédictifs font office non seulement de

¹³PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, chapitre 5.

critère *inter-théorique* pour trier les théories « matures » pouvant prétendre à la vérité des théories « immatures » du passé, mais aussi de critère *intra-théorique* pour distinguer, au sein de ces théories matures, entre les constituants centraux auxquels on peut se fier pour décrire la réalité et les postulats sans authentique effectivité.

Les succès prédictifs de la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel, par exemple, permettraient ainsi non seulement de classer cette théorie comme mature, mais aussi, par l'examen attentif de la manière dont ces prédictions ont été dérivées, de montrer que seules les équations fondamentales de cette théorie sont réellement indispensables pour engendrer ces succès et que le postulat de l'éther n'est qu'une fiction sans utilité.

L'étude historique précise des processus menant à de nouvelles prédictions, en étudiant des épisodes précis d'histoire des sciences, est ainsi devenue nécessaire non seulement pour débattre du bien-fondé du réalisme scientifique, mais aussi pour examiner quelle version du réalisme scientifique est acceptable. S. Psillos, Anjan Chakravartty¹⁴ et Peter Vickers¹⁵ par exemple, en étudiant différents exemples comme la théorie du fluide calorique ou l'électromagnétique de Maxwell, cherchent à identifier quels postulats de ces théories sont dignes de foi et quelles entités postulées existent réellement. J. Worrall et Ioannis Votsis¹⁶ d'un autre côté, s'appuyant notamment sur les prédictions de l'optique de Fresnel et de la classification des éléments chimiques de Mendeleïev, considèrent que seules les relations entre entités postulées par une théorie permettent de dériver de nouvelles prédictions. Ils soutiennent ainsi un « réalisme structural » selon lequel on se doit d'être sceptique sur la capacité de nos théories à identifier les entités qui composent la réalité, mais l'on peut se fier à leur description de la « structure » de cette réalité, c'est-à-dire des relations qu'entretiennent les entités entre elles. Au contraire, des

¹⁴CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 34-47.

¹⁵Peter VICKERS, "A Confrontation of Convergent Realism", *Philosophy of Science* 80.2 (2013), p. 189-211.

¹⁶Ioannis VOTSIS, "The prospective stance in realism", *Philosophy of Science* 78.5 (2011), p. 1223-1234.

anti-réalistes comme Timothy Lyons¹⁷ ou Kyle Stanford¹⁸, considèrent que des exemples comme les prédictions de Kepler ou d'Albert Einstein (1879-1955) prouvent que l'argument du miracle et la stratégie *divide et impera* ne sont pas valides.

Ainsi, une large dimension du débat entre réalistes et anti-réalistes s'est développée autour de la notion de nouvelles prédictions et consiste aujourd'hui à étudier le rôle de prédictions dans l'évolution historique des connaissances scientifiques et dans l'acceptation de nouvelles hypothèses.

L'état actuel de la controverse entre réalistes et anti-réalistes montre donc que l'étude attentive et diligente des raisonnements menant à de nouvelles prédictions, instruite par une histoire précise des succès prédictifs et de leur influence sur la confirmation des théories, est nécessaire. C'est pourquoi, si l'on veut clarifier le rôle des nouvelles prédictions dans les argumentations réalistes et anti-réalistes, il est indispensable de se poser la question de la structure logique des raisonnements prédictifs (pour comprendre comment sont dérivés les succès prédictifs), celle de l'influence réelle qu'ont eu ces succès dans l'histoire des sciences (pour savoir s'ils ont effectivement joué un rôle dans l'acceptation de nouvelles hypothèses) et d'analyser sur cette base le rôle que jouent les prédictions dans le choix des hypothèses (pour déterminer si les prédictions réussies ont valeur de preuve). Or ce travail global, qui montre les liens entre ces questions et les étudie avant d'aborder le débat sur les nouvelles prédictions, n'a pas encore été réalisé. Ainsi, même si l'examen critique de l'argument du miracle fondé sur les succès prédictifs constitue le fil directeur de cette thèse, celle-ci ne peut se résumer à ce simple examen mais doit aborder chaque niveau d'analyse de l'activité prédictive : logique, historique, choix des hypothèses et métaphysique.

¹⁷Timothy LYONS, "Scientific Realism and the Stratagema de Divide Et Impera", *British Journal for the Philosophy of Science* 57.3 (2006), p. 537–560.

¹⁸Kyle STANFORD, *Exceeding our grasp : Science, history, and the problem of unconceived alternatives*, Oxford, Oxford University Press, 2006.

Plan de la thèse

Le plan et l'originalité de cette thèse consistent ainsi à aborder l'activité prédictive des sciences empiriques dans son ensemble, pour déterminer en quoi consistent les succès de cette activité et quelle est leur portée.

La *première partie* de cette thèse est d'abord critique : je réfute l'opinion largement répandue selon laquelle tous les raisonnements prédictifs seraient identiques parce qu'ils auraient tous la même structure logique. Je propose donc différents modèles de prédiction afin de montrer que tous les succès prédictifs n'occupent pas la même place dans l'activité scientifique.

Dans la *deuxième partie*, j'examine le rôle des prédictions dans le changement scientifique, en étudiant l'histoire d'une discipline particulière : la cosmologie physique. J'ai choisi cette discipline parce qu'il s'agit d'une science suffisamment jeune pour pouvoir saisir la globalité de son histoire, parce que l'on y trouve différents types de prédictions et parce qu'elle fut animée par de nombreuses controverses au cours desquelles les cosmologistes ont eux-mêmes théorisé leur propre activité prédictive. J'étudie quel(s) type(s) de prédictions a eu un rôle déterminant pour l'apparition de cette discipline scientifique, son intégration aux autres sciences physiques, ainsi que l'acceptation et le rejet de modèles d'univers en compétition. Je montre que ce ne sont pas des prédictions isolées les unes des autres qui ont eu de l'influence dans le développement de la cosmologie, mais des séries de prédictions qui semblaient indiquer la fécondité de certaines hypothèses ou la stérilité de leurs rivales.

Dans la *troisième partie* de la thèse, j'examine le rôle des prédictions dans le choix des hypothèses, en exposant le débat sur le prédictivisme, afin de déterminer quelles prédictions peuvent servir de tests rigoureux aux théories scientifiques. En me fondant sur l'histoire de la cosmologie étudiée dans la partie précédente, je soutiens que seules les prédictions qui permettent d'évaluer la capacité prédictive d'une hypothèse représentent un succès scientifique dans le contexte de la confirmation. Un point crucial de cette partie est ainsi la définition précise de la notion de *capacité prédictive* et de la vertu épistémique de *fécondité* d'une théorie,

qui sont employées non seulement par les philosophes (par exemple pour distinguer une loi d'un simple énoncé général, ou un classement arbitraire d'une classification naturelle) mais aussi par les scientifiques eux-mêmes pour évaluer des hypothèses, des modèles ou des théories.

Enfin, dans la *quatrième partie*, je tire les conséquences des analyses précédentes en montrant que ces succès prédictifs qui révèlent une importante capacité prédictive constituent non pas un argument mais un défi pour les partisans de l'argument du miracle, parce qu'elles ont pour caractéristique d'utiliser des hypothèses irréalistes et qu'elles sont dérivables de postulats ontologiquement différents. Je soutiens donc que les succès prédictifs ne permettent pas d'identifier quels aspects ou quelles parties des théories confirmées sont vrais. Je conclus en montrant que seule l'étude des rapports entre prédiction et expérimentation permet de donner un rôle aux prédictions dans les argumentations réalistes.

Première partie

La structure des prédictions scientifiques

Introduction de la première partie

L'un des domaines de l'épistémologie qui a connu les plus intenses recherches durant les cinquante dernières années est probablement la logique de l'explication scientifique. L'objectif de ces recherches est de représenter fidèlement les raisonnements explicatifs et d'identifier les conditions pour reconnaître les explications scientifiques légitimes. À cette fin, les philosophes des sciences ont développé des *modèles d'explication*, c'est-à-dire ont essayé de montrer que certaines structures de raisonnements seraient communes aux différentes explications scientifiques par-delà la diversité des sciences et des époques.

Cependant, si la modélisation de l'explication scientifique est un programme de recherche philosophique florissant depuis les années 1950, on ne compte que peu de tentatives systématiques pour construire une logique de la prédiction scientifique. La question « qu'est-ce qu'une prédiction scientifique ? » est pourtant au cœur de nombreux débats philosophiques et scientifiques, que ce soit de manière explicite ou implicite.

L'objectif de cette première partie est de montrer qu'il n'existe pas un seul et unique modèle de prédictions scientifiques¹, et que distinguer plusieurs structures logiques des prédictions permet non seulement de clarifier certaines controverses philosophiques et scientifiques, mais aussi de mettre en lumière les problèmes posés par l'impossibilité de donner un seul critère nécessaire et suffisant pour caractériser l'activité prédictive.

Dans le premier chapitre de cette partie, on examine la conception classique des prédictions scientifiques, qui est la plus souvent implicitement adoptée par les philosophes des sciences. Selon cette conception classique, l'activité prédictive est fondée sur l'utilisation de lois scientifiques, ce qui signifie que les lois scientifiques seraient un élément indispensable des raisonnements prédictifs. En procédant à l'analyse conceptuelle de la notion de prédiction scientifique, je critique la thèse selon laquelle les modèles dits de « loi couvrante » issus des recherches pion-

¹Dans cette partie, on emploie l'expression « modèle de prédiction » pour désigner les modèles qui visent à représenter la structure logique commune à une classe de prédictions scientifiques. L'expression « modèle prédictif » désigne en revanche le modèle scientifique d'un système dont on cherche à prédire le comportement.

nières de Carl Hempel (1905-1997) permettent de formaliser de manière cohérente cette conception classique. Je montre ainsi dans ce chapitre que les modèles de loi couvrante ne fournissent pas les conditions *nécessaires* pour identifier la structure logique des prédictions scientifiques, c'est-à-dire qu'il peut exister des formes de processus prédictifs ne s'y conforment pas. Je montre ensuite que ces modèles ne fournissent pas non plus les conditions *suffisantes* des prédictions scientifiques, c'est-à-dire qu'ils ne permettent pas non plus de formaliser la conception classique des prédictions guidées par des lois, et je propose de les modifier pour que cela soit le cas.

Le deuxième chapitre a pour objectif de déterminer, non plus par analyse conceptuelle mais à partir d'études de cas et de controverses scientifiques, d'autres formes de raisonnements prédictifs que ceux guidées par des lois couvrantes. Je soutiens que deux autres modèles de prédictions, les prédictions *guidées par des modèles* et les prédictions *guidées par des données*, apparaissent fréquemment dans les sciences naturelles non-expérimentales comme la biologie évolutive et la géomorphologie, et qu'ils jouent un rôle de plus en plus important avec l'apparition de recherches fondées sur l'utilisation intensive de données massives numérisées.

Je conclus que cette diversité dans les modèles de processus prédictifs ne permet pas d'affirmer aucune précision qu'une prédiction réussie est un succès suffisant pour confirmer une théorie ou la considérer comme approximativement vraie. Cela nous amène donc, dans les parties suivantes de la thèse, à essayer d'identifier quels succès prédictifs peuvent être dits provoquer un changement théorique (partie 2) et confirmer une théorie (partie 3), afin d'évaluer dans un dernier temps (partie 4) les argumentations réalistes fondées sur les nouvelles prédictions.

Chapitre 1

Les prédictions guidées par des lois et les modèles de loi couvrante

Eschyle apparaît au bout de la route et l'aigle lâche une carapace de tortue. Connaissant h l'altitude de l'aigle et la loi de la chute des corps $t = \sqrt{2h/g}$ (où g est l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre) je peux calculer t_{chute} l'instant où la carapace touchera le sol. Je connais la vitesse de déplacement d'Eschyle et la distance qui le sépare du point de chute de la tortue : je peux donc aussi calculer $t_{passage}$, l'instant auquel il passera à ce point. Si j'en arrive à la conclusion $t_{chute} = t_{passage}$ avant que le tragique événement n'ait lieu, j'aurai réussi à prédire la mort du dramaturge.

Cet exemple est représentatif de la conception classique des prédictions scientifiques : on a inféré l'occurrence d'un phénomène futur à partir d'un ensemble d'autres connaissances. Parmi ces connaissances, on trouve une loi physique et des informations sur les conditions particulières de la situation (l'altitude h , la longueur de la route, la vitesse d'Eschyle) permettant de l'appliquer. Ces conditions concernant toutes des propriétés de la situation accessibles avant que l'accident n'ait lieu, on parle de *conditions initiales* ou *conditions antécédentes* du système formé par la tortue, Eschyle et la route. Enfin, on a utilisé des informations concernant la valeur de la constante g et la définition de la vitesse $v = d/t$,

informations qui font partie de la théorie de la chute des corps à laquelle appartient aussi la loi dont on s'est servi.

La conception classique de la structure logique des prédictions scientifiques est donc la suivante : une prédiction consiste à inférer (ici par une déduction) l'occurrence future d'un phénomène à partir de conditions initiales et de lois générales. Dans ce chapitre je montre d'abord (section 1) que les principales caractéristiques de cette conception classique se retrouvent dans les modèles de loi couvrante développés en grande partie par C. Hempel de 1948 à 1965. Ces modèles considérant la structure logique des arguments explicatifs et prédictifs comme identiques, je montre ensuite (section 2) que les critiques adressées à ce modèle concerne sa capacité à représenter l'activité explicative et non l'activité prédictive.

La fin du chapitre (section 3 et 4) est consacrée aux limites des modèles de loi couvrante. A-t-on réellement besoin de lois pour prédire la mort d'Eschyle ? Peut-on se contenter d'une simple application de la loi de la chute libre pour faire cette prédiction ou doit-on calculer la résistance de l'air, le coefficient aérodynamique de la carapace, etc. ? Quelles hypothèses auxiliaires et conditions aux limites doit-on supposer pour estimer que les sources de perturbations extérieures au système sont négligeables ?

Les intuitions qui se cachent derrière la conception classique des prédictions n'étant ni claires ni évidentes, je soutiens donc que les modèles de loi couvrante ne fournissent des conditions ni nécessaires (section 3) ni suffisantes (section 4) pour identifier la structure logique des prédictions scientifiques.

L'objectif de ce chapitre est ainsi de montrer que les modèles de loi couvrante ne sont pas les seuls modèles de prédictions possibles, et que la question « quelles sont les différentes formes de prédictions ? » est légitime.

1.1 Les quatre caractéristiques des modèles de loi couvrante

L'appellation de modèles de « loi couvrante » originellement introduite par Dray¹ est adoptée par Hempel² pour désigner à la fois le premier modèle d'explication qu'il avait développé avec Paul Oppenheim (1885-1977) en 1948³ – communément appelé modèle DN (pour déductif-nomologique) – et les modèles d'explication statistique exposés en 1962⁴ – les modèles DS (déductif-statistique) et IS (inductif-statistique). Le point commun de tous ces modèles est de donner un rôle essentiel aux lois scientifiques dans les explications.

Le modèle DN se présente comme suit : l'explication ou la prédiction d'un phénomène est la déduction d'un énoncé E décrivant ce phénomène (l'explanandum) à partir d'un autre ensemble d'énoncés (l'explanans). Celui-ci comprend des énoncés C_1, C_2, \dots, C_k qui décrivent les conditions antécédentes spécifiques du phénomène décrit par E , et une ou plusieurs lois générales L_1, L_2, \dots, L_r . La structure des prédictions dans le modèle DN est donc un raisonnement déductif satisfaisant certaines conditions (numérotées de R1 à R4) : l'explanandum doit être une conséquence logique de l'explanans (R1), celui-ci doit nécessairement contenir au moins une loi scientifique (R2), pouvoir être testé empiriquement (R3) et être vrai – ou avoir une forte probabilité de l'être sur la base des données disponibles (R4)⁵.

$$\text{Dédution logique} \frac{\text{Explanans} \left\{ \begin{array}{l} C_1, C_2, \dots, C_k \\ L_1, L_2, \dots, L_r \end{array} \right.}{\text{Explanandum} \{ E$$

¹William DRAY, “The historical explanation of actions reconsidered”, *Philosophy and History* (1963), p. 105–135.

²Carl HEMPEL, “Aspects of Scientific Explanation”, *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*, New York, Free Press, 1965, p. 331–496, p. 346.

³Carl HEMPEL et Paul OPPENHEIM, “Studies in the Logic of Explanation”, *Philosophy of Science* 15.2 (1948), p. 135–175.

⁴Carl HEMPEL, “Deductive-Nomological vs. Statistical Explanation”, *Minnesota studies in the philosophy of science* (1962).

⁵HEMPEL et OPPENHEIM, “Studies in the Logic of Explanation”, p. 137.

Notons que pour Hempel et Oppenheim, il est aussi possible de parler d'*explication de loi* dans le cas où l'on utilise des lois générales dans l'*explanans* pour déduire un *explanandum* qui est une autre loi.

Les modèles DS et IS ont été développés notamment sous l'impulsion d'un article de 1958 de Nicholas Rescher intitulé « The Stochastic Revolution and the nature of scientific explanation »⁶ qui insiste sur l'importance des lois et raisonnements statistiques dans l'activité scientifique contemporaine. Alors que dans le modèle DN ce sont des lois déterministes – que l'on peut représenter selon Hempel sous la forme d'un énoncé universel d'implication matérielle – qui apparaissent dans l'explanans, dans les modèles DS et IS il s'agit de lois statistiques.

Les modèles DS décrivent les cas où l'on explique une loi statistique en la *déduisant* d'autres lois statistiques, tandis que les modèles IS concernent les cas où l'on explique l'occurrence d'un phénomène particulier en l'*induisant* à partir d'une loi statistique⁷. Dans ce dernier cas, l'inférence explicative ou prédictive est une induction plutôt qu'une déduction, mais le rôle essentiel des lois reste intact.

Ainsi, les modèles de loi couvrante représentent des raisonnements explicatifs et prédictifs reposant sur des inductions autant que sur des déductions, qui peuvent être réalisés à partir de lois déterministes aussi bien que statistiques. Cependant, malgré cette différence, ces modèles présentent de grandes similitudes parce qu'ils partagent quatre caractéristiques :

1. *Les prédictions sont des énoncés qui portent sur le futur.*

Pour chacun de ces modèles la différence entre prédiction et explication ne concerne que le moment où est fait le raisonnement déductif ou inductif. Elle est présentée par Hempel et Oppenheim dans leur article de 1948 comme étant « de caractère pragmatique » : si E est donné, c'est-à-dire si l'on sait que le phénomène décrit par E s'est déjà produit, on parle d'explication ; en revanche, si E est dérivé

⁶Nicholas RESCHER, “The stochastic revolution and the nature of scientific explanation”, *Synthese* 14.2 (1962), p. 200–215.

⁷Le modèle IS impose une restriction supplémentaire (le réquisit de spécificité maximale (HEMPEL, “Aspects of Scientific Explanation”, p. 398)), que l'on ne discutera pas ici.

avant l'occurrence du phénomène qu'il décrit, on parle de prédiction⁸.

Cette thèse, dite de *l'identité structurale* entre prédiction et explication⁹, implique donc que l'objet d'une prédiction est un énoncé qui porte sur le *futur*¹⁰.

2. Les prédictions nécessitent de recourir à des lois scientifiques.

Les prédictions sont des raisonnements, déductifs ou inductifs, dont une des prémisses est nécessairement une loi. Cette loi peut être expliquée si elle peut être déduite d'autres lois. Il en résulte une conception axiomatique et hiérarchique des théories et de l'activité scientifique puisqu'une prédiction ou explication de phénomènes empirique ne peut avoir lieu que si l'on dispose d'au moins une loi qui subsume ce phénomène, loi qui elle-même ne peut être expliquée que si l'on peut la déduire d'autres lois, remontant ainsi en dernière instance à des lois fondamentales qui jouent un rôle équivalent aux axiomes dans les théories mathématiques¹¹.

⁸HEMPEL et OPPENHEIM, "Studies in the Logic of Explanation", p. 138.

⁹HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 367.

¹⁰Cependant, comme on le verra, dans « Aspects of Scientific Explanation » Hempel admet plusieurs entorses à cette identité structurale.

¹¹Cette conception des théories scientifiques qui fait corps avec les modèles de loi couvrante, n'est pas, à strictement parler, celle que l'on appelle la conception « syntaxique » des théories scientifiques, même si par ailleurs Hempel partage cette conception. La conception syntaxique représente les théories scientifiques comme un ensemble d'énoncés fondamentaux (comparables aux axiomes des théories mathématiques) conjugué à leur clôture déductive (l'ensemble des énoncés que l'on peut en déduire). Cependant, la conception syntaxique suppose en outre que ces énoncés fondamentaux soient formulables dans un langage artificiel L et qu'ils forment un système déductif qui est non-interprété tant qu'on ne leur adjoint pas un ensemble de règles de correspondance ou de traduction permettant de traduire certains énoncés en un langage d'observation composé uniquement de termes observables.

Or une théorie scientifique n'a pas besoin de remplir toutes ces conditions pour permettre de réaliser des explications et des prédictions telles qu'elles sont formalisées par Hempel. Il suffit qu'elle soit composée d'énoncés généraux reconnus comme des lois s'appliquant à un nombre indéfini de cas, lois pouvant elles-mêmes être déduites d'autres énoncés du même genre. Voilà pourquoi il semble plus correct de parler de théories *axiomatisées et hiérarchisées* pour désigner la conception implicite des théories des modèles de loi couvrante, que d'employer l'expression « conception syntaxique » pouvant mener à des confusions inutiles. Sur la conception syntaxique des théories, voir Marion VORMS, "Théories, modes d'emploi. Une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques", thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2009, p. 238-239).

3. *Les prédictions sont formulées dans le cadre d'une seule théorie.*

Les prédictions ne mobilisent que des lois, des définitions et des constantes appartenant à la même théorie. Cette caractéristique des modèles de loi couvrante n'est pas mentionné explicitement par Hempel, mais il précise que dans une explication « les lois L_1, L_2, \dots, L_r invoquées dans son explanans impliquent logiquement une loi L^* qui par elle-même suffirait à expliquer l'évènement explanandum par référence aux conditions particulières notées dans les énoncés C_1, C_2, \dots, C_k »¹². Si cette loi L^* est impliquée par les lois L_1, L_2, \dots, L_r , c'est que celles-ci sont formulées dans le même langage théorique et donc proviennent de la même théorie.

4. *Les prédictions ne concernent que des occurrences particulières.*

Lorsque Hempel étudie les exceptions à la thèse de l'identité structurale entre prédiction et explication, il affirme que « les explications de lois ne sont pas des prédictions potentielles puisque les lois expriment des uniformités hors du temps et donc ne font référence à aucun temps particulier, que ce soit le passé, le présent ou le futur »¹³. Cette affirmation prouve à nouveau que pour Hempel les prédictions sont essentiellement caractérisées temporellement, par une référence au futur mais elle montre aussi que puisque l'on ne peut pas prédire de lois, on ne peut donc prédire que les occurrences particulières d'un phénomène.

1.2 Les critiques existantes des modèles de loi couvrante

Ces quatre caractéristiques des modèles de loi couvrante en tant que modèles de prédiction peuvent sembler prêter le flanc à de nombreuses critiques. Cependant, si dès les années 1950, de nombreuses objections ont été opposées aux modèles de loi couvrante, ces objections ont donné

¹²HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 346.

¹³HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 368.

lieu au développement de modèles alternatifs d'explication scientifique¹⁴ mais pas de prédiction scientifique. Comme le fait remarquer Heather Douglas¹⁵, les modèles d'explication qui ont succédé aux modèles de loi couvrante de Hempel ne sont plus des modèles de prédiction, sans pour autant que les philosophes des sciences aient cherché à construire de nouveaux modèles pour rendre compte de la structure logique des prédictions scientifiques.

Dans cette section je montre que cet abandon des recherches sur la structure logique des raisonnements prédictifs est dû au fait que l'immense majorité des objections formulées à l'encontre des modèles de loi couvrante visaient ces modèles en tant que modèles d'explication et non en tant que modèles de prédiction, comme si leur principal défaut était de rabattre la structure des raisonnements explicatifs sur celle des raisonnements prédictifs.

En effet, une grande partie des objections présentées aux modèles de loi couvrante est qu'ils ne représentent pas l'*asymétrie* des explications : si l'on peut par exemple expliquer la longueur de l'ombre d'une tour à partir de la hauteur de cette tour et de la position du soleil, il semble contre-intuitif, voire absurde, de vouloir expliquer la hauteur d'une tour à partir de la longueur de son ombre et de la position du soleil¹⁶. Il semble impossible de pouvoir intervertir l'explanans et l'explanandum lorsque l'on propose une explication et c'est pourtant ce que permettent les modèles de loi couvrante de Hempel.

Cette asymétrie est due au fait que la notion d'explication recouvre intuitivement celle de causalité : expliquer, c'est donner la vraie cause. Ainsi, de même, il ne semble pas que la chute du mercure d'un baromètre permette d'expliquer l'imminence d'une tempête parce qu'il n'en

¹⁴D'excellents exposés des différents modèles d'explication et de leurs limites sont disponibles, aussi bien en français qu'en anglais. Voir notamment Denis BONNAY, "L'explication scientifique", *Précis de philosophie des sciences*, Paris, Vuibert, 2011, chap. 1, p. 13–61, Laura FELINE, *Explication scientifique (A)*, 2017, URL : <http://encyclo-philo.fr/10992-2/> et Wesley SALMON, "Four decades of Scientific Explanation", *Minnesota Studies for Philosophy of Science* 8 (1989), p. 3–220.

¹⁵Heather DOUGLAS, "Reintroducing prediction to explanation", *Philosophy of Science* 76.4 (2009), p. 444–463.

¹⁶On trouve cet exemple dans Sylvain BROMBERGER, "Questions", *The Journal of Philosophy* 63.20 (1966), p. 597–606.

est pas la cause¹⁷ : ces deux phénomènes ont une cause commune qui les expliquent tout deux, la baisse de la pression atmosphérique.

Mais, à la différence de la notion d'explication, celle de prédiction n'inclut pas forcément celle de causalité. Un raisonnement prédictif permet de fixer la valeur d'une variable sans avoir à la mesurer en inférant cette valeur à partir des corrélations de cette variable avec d'autres variables. Mais ces corrélations n'ont pas à être des relations de dépendances causales : Max Kistler a notamment montré que selon les contextes, il pouvait exister des relations entre phénomènes qui étaient ou non considérées comme causales¹⁸. Il fait remarquer en outre que la pertinence de la notion même d'explication causale repose sur le fait qu'il existe des explication non causales¹⁹. De même, il n'y aurait pas de sens à distinguer des prédictions causales et non causales si seules les premières existaient.

De plus, même si ces corrélations sont bien des relations causales, une prédiction n'a pas à suivre l'ordre des causes et des effets : si l'on doit expliquer les causes par les effets, il semble possible de prédire les causes par les effets ou certains effets par d'autres. C'est ainsi que l'on peut concevoir un exercice d'astronomie qui consisterait à prédire la taille d'un immeuble en ne disposant que d'une photographie de son ombre et d'informations relatives à la date et à l'heure à laquelle cette photographie a été prise. De même, on peut utiliser un baromètre pour prédire l'arrivée d'une tempête (c'est même son principal usage), bien que la chute du mercure ne soit pas la cause de cette tempête.

Ainsi, l'immense majorité des objections faites aux modèles de loi couvrante leur reproche de ne pas prendre en compte la spécificité de l'explication par rapport à la prédiction et non de mal représenter la structure des arguments prédictifs²⁰.

¹⁷Cet exemple est celui de Michael SCRIVEN, "Explanations, predictions, and laws", *Minnesota studies in the philosophy of science* 3 (1962), p. 170–230.

¹⁸Max KISTLER, "La causalité", Anouk BARBEROUSSE et Michael COZIC, *Précis de philosophie des sciences*, Paris, Vuibert, 2011, chap. 3, p. 100–140, p. 140.

¹⁹Max KISTLER, *Causalité et lois de la nature*, Mathesis (Paris, France), Vrin, 2000, p. 11.

²⁰Une grande partie de ces critiques s'est concentrées sur les *disciplines et théories* pour lesquelles la thèse de l'identité structurale entre prédiction et explication était valide. Michael Scriven notamment, a soutenu en 1959 l'argument selon lequel la théorie de l'évolution par sélection naturelle est un exemple de théorie ayant un pouvoir expli-

Le seul qui ait explicitement soutenu qu'« explication et prédiction ont des caractéristiques logiques différentes »²¹ est, à ma connaissance, Israel Scheffler (1923-2014) dans un article de 1957 :

en accord avec la notion ordinaire et dominante de prédiction, toute déclaration ou toute inscription est une prédiction si elle affirme explicitement quelque chose sur un période postérieure à la sienne²².

C'est à partir de cette définition des prédictions comme énoncés concernant le futur que Scheffler attaque la thèse de l'identité structurale de Hempel. En premier lieu, il fait remarquer qu'à la différence des explications, les prédictions ne nécessitent pas forcément de faire appel à des lois scientifiques, car « les voyants, les prophètes et les journalistes font tous des prédictions, comme les scientifiques » sans l'aide d'aucune généralisation empirique. En second lieu, Scheffler souligne que c'est parce que les prédictions ne sont que des énoncés concernant le futur qu'ils peuvent être aussi bien faux que vrais et ainsi servir à confirmer ou réfuter une hypothèse. Au contraire les explications, elles, ne peuvent pas être fausses et ne peuvent servir dans le contexte de la confirmation.

Cette critique de Scheffler est d'importance : effectivement, une des caractéristiques centrales des prédictions est qu'elles semblent jouer un rôle important dans la confirmation des hypothèses et théories dont elles sont dérivées. Or une définition des prédictions comme celle des modèles de loi couvrante exclut d'emblée toute capacité de confirmation aux prédictions, ce qui est pour le moins contre-intuitif. Cependant, les objections de Scheffler reposent sur une conception des prédictions comme énoncé portant sur l'avenir. Je montre dans la section suivante que cette conception de la structure des raisonnements prédictifs rencontre de nombreuses difficultés, notamment parce qu'elle laisse de côté les cas de « ré-

catif mais non prédictif, ce qui limiterait la portée de la thèse de l'identité structurale aux sciences expérimentales. Voir Michael SCRIVEN, "Explanation and Prediction in Evolutionary Theory", *Science* 130.3374 (1959), p. 477-482. Le débat qui s'en suivit sur la capacité prédictive de la théorie de l'évolution et d'autres sciences naturelles non-expérimentales est examiné en détail dans le deuxième chapitre de cette thèse.

²¹Israel SCHEFFLER, "Explanation, prediction, and abstraction", *The British Journal for the Philosophy of Science* 7.28 (1957), p. 293-309, p. 298.

²²SCHEFFLER, "Explanation, prediction, and abstraction", p. 295.

trodictions » (aussi appelées postdictions) qui consistent à prédire un phénomène passé avant d'en observer les traces ou à montrer que l'on aurait pu prédire l'existence d'un nouveau phénomène avant de le découvrir par l'observation.

Ainsi, à part ces objections de Scheffler, les modèles de loi couvrante n'ont pas été critiqués *en tant que modèles de la structure logique des raisonnements prédictifs*, ce qui explique qu'aucun modèle alternatif de prédiction n'ait été développé. Dans les deux sections suivantes de ce chapitre, je me livre à une telle critique des principales caractéristiques des modèles de loi couvrante en tant que modèles prédictifs pour montrer la pluralité des pratiques constituant l'activité prédictive des sciences empiriques.

1.3 Les modèles de loi couvrante posent-ils des conditions nécessaires pour la structure des prédictions ?

L'objectif de cette partie étant de détruire l'illusion que la conception classique des prédictions n'est pas la seule structure possible des raisonnements prédictifs, je fais subir dans cette section à la conception hempelienne des prédictions le même type d'examen qu'ont subi les modèles de loi couvrante d'explication. Je propose donc d'examiner les quatre caractéristiques des modèles de loi couvrante exposées dans la section 1.1 et d'étudier si ce sont des conditions nécessaires que doit remplir un argument pour être légitimement qualifié de prédiction. Comme l'ont fait les philosophes de l'explication, je fournis des contre-exemples en proposant des cas que l'on n'hésiterait pas à qualifier de prédiction mais qui ne respectent pas ces caractéristiques des modèles de loi couvrante. Je montre ainsi qu'aucune des quatre caractéristiques de ces modèles de loi couvrante n'est une condition nécessaire des raisonnements prédictifs.

1.3.1 Les prédictions concernent-elles le futur ?

La première caractéristique des modèles de prédiction de loi couvrante est celle qui rencontre le plus de contre-exemples. Le prix Nobel de physique 2008 fut ainsi décerné à Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa « pour leur découverte de l'origine de la brisure de symétrie qui prédit l'existence d'au moins trois familles de quarks dans la nature »²³. Cet emploi du terme de prédiction ne signifie pas que la théorie de la brisure de symétrie permette d'inférer l'occurrence future d'un phénomène que seraient les trois familles de quarks en question. De même, aucune prédiction liée à l'existence d'un objet ou d'un type d'objet, que ce soit la prédiction de l'existence de Neptune ou de l'existence du Boson de Higgs, ne concerne réellement l'occurrence d'un phénomène futur. Ce qui est à venir dans ces cas là, ce n'est pas le phénomène prédit, mais sa découverte : le phénomène est découvert théoriquement, comme la conséquence d'une théorie, avant de l'être empiriquement, au sein du laboratoire ou de l'observatoire ²⁴ .

La différence entre ces deux conceptions des prédictions peut être synthétisée par la distinction entre *prévision* et *prédiction*. Une *prévision* est l'application d'une théorie déjà confirmée pour tenter de déterminer l'occurrence future d'un phénomène, souvent à des fins pratiques, comme lorsqu'on parle de prévisions météorologiques. Une *prédiction*, est la dérivation d'une conséquence observable d'une théorie qui n'a pas encore été observée, que celle-ci soit passée, présente ou future. La prédiction sert moins que la prévision dans des contextes pratiques, mais bien plus dans le contexte de la confirmation des théories, car la réalisation d'une expé-

²³NOBELPRIZE.ORG, "The Nobel Prize in Physics 2008", 2013, URL : http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/.

²⁴Certains auteurs, comme le philosophe de la biologie Zdzislaw Kochanski, interprètent les articles de Hempel dans ce sens. Selon lui, pour les modèles de loi couvrante, il y a prédiction d'un phénomène non pas quand il apparait après la formulation de la prédiction mais que sa découverte a lieu après celle-ci – même si le phénomène a déjà eu lieu depuis longtemps. Cependant, la plupart des passages de « The Logic of explanation » et « Aspects of scientific explanation » cités ci-dessus, semblent montrer que Hempel n'adopte pas cette conception des prédictions et Kochanski lui-même reconnaît que son interprétation des textes de Hempel va parfois à l'encontre de ceux-ci. Voir Zdzislaw KOCHANSKI, "Conditions and Limitations of Prediction-Making in Biology", *Philosophy of Science* (1973), p. 34.

rience ou d’une observation visant à tester une prédiction, sert souvent d’évaluation à une théorie²⁵.

Cependant, même dans le contexte de la confirmation, cette caractérisation des prédictions comme inférence d’un phénomène encore non observé ne va pas de soi. En effet, lorsqu’il s’agit de confirmer une hypothèse, l’important n’est pas tant qu’un phénomène ait ou non déjà été observé mais qu’il puisse faire office de preuve en faveur de cette hypothèse et donc qu’il soit dérivable naturellement de cette hypothèse et non de manière *ad hoc*. Toute la question est alors de savoir ce que l’on entend par dérivation naturelle et *ad hoc* d’un phénomène. Mais il est clair qu’un phénomène peut être dérivé naturellement — et donc prédit — à partir d’une hypothèse sans pour autant qu’il soit inconnu au moment de sa dérivation.

C’est en ce sens que l’on peut dire par exemple que la théorie de la gravitation newtonienne permet de prédire les marées terrestres. Les marées et leurs variations d’intensité et de durée étaient connues depuis (au moins) l’antiquité, mais c’est la théorie newtonienne qui permet de dériver ce phénomène de la position de la Lune, de la Terre et du soleil²⁶. C’est pour cela que les marées et leurs variations ont constitué une preuve cruciale en faveur de l’attraction universelle : l’important n’est pas que les marées et leurs variations aient été un phénomène connu ou non de Newton et de ses contemporains, mais que cette théorie n’ait pas été

²⁵Comme on le montre dans la troisième partie de la thèse consacrée aux rôle des prédictions en contexte de confirmation des théories, la raison pour laquelle Hempel, dès 1945 dans son article sur la logique de la confirmation, refuse de donner un rôle aux prédictions ce contexte, est qu’il identifie prédiction et prévision. Puisqu’il considère ainsi que toute prédiction est l’application d’une hypothèse ou d’une théorie déjà confirmée, il est normal qu’il souligne « le fait qu’une analyse adéquate des prédictions scientifiques (et, de manière analogue, des explications) requiert une analyse du concept de confirmation » (Carl HEMPEL, “Studies in the Logic of Confirmation (II.)”, *Mind* 54.214 (1945), p. 97–121, p. 101. La notion de prédiction entendue comme prévision ne peut donc, sous peine de cercle, entrer dans la définition de celle de confirmation, ce qui n’est pas le cas de celle de prédiction entendue comme inférence du connu à l’inconnu. Voir la section 6.2.1 pour plus de détails sur les rapports entre confirmation et prédiction dans la philosophie de Hempel.

²⁶En ce sens, les termes de prédiction et d’explication sont parfaitement interchangeables, si l’on adopte la même conception de l’explication que Hempel. On peut en effet aussi bien dire que la théorie newtonienne explique les marées qu’elle les prédit. On revient sur la distinction entre prédiction et explication dans la conclusion de cette partie.

construite uniquement pour rendre compte de ce phénomène et que l'on puisse pourtant le déduire directement de ses hypothèses fondamentales.

On peut aussi dire que la théorie de Newton a *prédit* le phénomène des marées parce qu'aucune autre théorie n'était capable de rendre compte adéquatement de ce phénomène auparavant²⁷. Ce phénomène aurait ainsi joué un rôle important dans la confirmation de la théorie newtonienne en permettant de la départager de ses rivales.

Ainsi, selon que l'on met l'accent sur le fait qu'un phénomène n'ait pas été observé au moment où l'on propose une nouvelle théorie, sur le fait qu'il n'ait pas été employé dans la construction de cette théorie, ou sur le fait qu'il départage cette théorie de ses rivales, on obtient trois définitions différentes (mais pas forcément incompatibles comme on le montre dans la troisième partie de cette thèse, section 6.4.1) de la *nouveauté* d'un phénomène, par rapport à une théorie donnée. Si l'on considère qu'un phénomène *nouveau* est forcément prédit, on peut ainsi dire qu'une théorie *prédit* un phénomène dans au moins trois sens différents. Le philosophe des sciences Alan Musgrave²⁸ a fixé la terminologie de ces trois conceptions des prédictions :

- Si un raisonnement permet d'inférer un phénomène inconnu à partir d'une théorie, il est dit *temporellement nouveau* car ce phénomène n'était pas connu au moment où il a été dérivé de cette théorie.
- Si un raisonnement permet d'inférer un phénomène connu mais non utilisé dans la construction d'une théorie, il est dit *heuristiquement nouveau* car en rendre compte n'était pas un des buts qui a guidé l'élaboration de la théorie.
- Si un raisonnement permet d'inférer un phénomène connu à partir d'une théorie mais qu'aucune autre ne permet de dériver, il est dit

²⁷La théorie des marées que Galilée expose dans la quatrième journée du *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* repose sur l'inertie imprimée aux masses d'eau des océans par la rotation journalière de la Terre et sa révolution autour du soleil. Il en résulte qu'elle attribue aux marées une périodicité de 24h et non 12h. Elle permet donc bien de prédire le phénomène des marées mais non leur périodicité semi-quotidienne

²⁸Alan MUSGRAVE, "Logical versus Historical Theories of Confirmation", *British Journal for the Philosophy of Science* (1974).

théoriquement nouveau, car la théorie en question est la première à en rendre compte.

Ces différentes conceptions de la nouveauté des phénomènes prédits sont comparés et analysés en détails dans les chapitres consacrés aux rôles des prédictions dans la confirmation des théories scientifiques. On peut cependant conclure ici qu'il est tout à fait possible de fournir des exemples de prédictions qui ne satisfont pas la première des caractéristiques des modèles de loi couvrante.

1.3.2 Toute prédiction nécessite-t-elle des lois ?

Le problème traité ici est de savoir si une ou plusieurs lois apparaissent essentiellement dans les prémisses des raisonnements prédictifs, comme le soutient Hempel dans « Aspects of Scientific Explanation » et dans les autres textes où il développe les modèles de loi couvrante d'explication et de prédiction. L'utilisation de lois dans les explications et prédictions scientifiques étant la principale caractéristique des modèles de loi couvrante, cette question est cruciale pour l'objectif de cette partie, qui est de montrer qu'il existe d'autres types de prédictions que celles reposant essentiellement sur des lois.

Mais ce problème tire aussi son importance du fait que, comme on l'a vu, cette caractéristique des modèles de loi couvrante implique une certaine conception des théories scientifiques. Si chaque explication ou prédiction nécessite (au moins) une loi, loi qui elle-même est susceptible d'être expliquée par déduction d'autres lois, cela signifie que prédire un phénomène passe d'abord par une série d'inférences déductives. Ainsi, prédire (ou expliquer) un phénomène consisterait avant tout pour Hempel à réaliser des déductions dans le cadre d'une théorie scientifique donnée sous la forme d'un ensemble de lois déductibles à partir d'un petit ensemble d'hypothèses ou lois fondamentales. C'est une activité de théoricien, l'expérimentateur ou l'observateur n'y prenant part que de manière indirecte, s'il faut tester la prédiction : il doit alors trouver un moyen pour réaliser les conditions initiales et pour contrôler si le phénomène décrit par E se produit.

À lire Hempel trop rapidement, on pourrait avoir l'impression qu'il admet que toutes les prédictions ne nécessitent pas de lois :

Pour Hempel, en effet, toute généralisation empirique n'est pas un énoncé nomologique puisqu'il peut exister des généralisations accidentelles de la forme « tous les hommes dans cette pièce sont les troisièmes fils de leur famille » ou « toutes les poires sur cet arbre sont mûres ». Or il semble admettre que l'on puisse formuler des prédictions à partir d'énoncés qui ne sont pas *nomologiques*, c'est-à-dire des énoncés ayant la forme d'une loi scientifique :

Certaines trouvailles empiriques peuvent fournir d'excellentes bases pour croire que l'orientation du champ magnétique terrestre montre des variations diurnes et séculaires, sans expliquer le moins du monde pourquoi. [...] Les inférences prédictives impliquées ici sont plus inductives que déductives ; mais ce qui les empêche d'être de potentielles explications n'est pas leur caractère inductif, mais le fait qu'elles n'invoquent aucune loi ou principe théorique, aucun énoncé explicatif ayant une portée générale²⁹.

De même, Hempel semble admettre l'objection formulée par Israel Scheffler dans une note de son article de 1957 « Explanation, prediction, abstraction »³⁰ :

Comme le remarque Scheffler, une prédiction scientifique peut être fondée sur un ensemble fini de données qui n'inclut aucune loi et qui n'aurait aucun pouvoir explicatif. Par exemple, un ensemble fini de données obtenues par le test intensif de l'hypothèse selon laquelle la résistance électrique des métaux augmente avec la température, pourrait offrir un bon support à cette hypothèse et ainsi fournir une base acceptable à la prédiction que pour une instance encore non observée, une augmentation de température s'accompagnera d'une augmentation de la résistance. [...] Des cas comme celui-ci soulèvent la

²⁹HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 368.

³⁰SCHEFFLER, "Explanation, prediction, and abstraction", p. 296.

question de savoir s'il existe d'authentiques modes de prédictions qui procèdent de particuliers à particuliers, sans user de lois générales comme celles qui semblent requises pour toute explication adéquate³¹.

Cependant, Hempel ne considère pas que l'argument de Scheffler soit concluant pour autant. Même si, pour une prédiction comme celle concernant la résistance des métaux, on ne trouve pas de loi « comme celles qui semblent requises pour toute explication », cela ne veut pas dire qu'*aucune* loi n'intervient dans la formulation de la prédiction.

Voici comment on peut reconstruire l'argument de Hempel. Une telle prédiction doit prendre la forme suivante : l'hypothèse « la résistance des métaux augmente avec la température » est confirmée par induction sur l'ensemble fini de données. Cette confirmation fournit un certain degré de probabilité à cette hypothèse qui, utilisée comme une loi, permet ensuite de calculer quelle sera la résistance du métal lors de la prochaine expérience. Le résultat de ce calcul n'est pas certain et dépend du degré de probabilité de l'hypothèse elle-même, ainsi que d'un certain nombre de lois statistiques permettant d'inférer d'un échantillon de cas observés à un cas non-observé. Cette prédiction repose donc sur une inférence probabiliste et suppose des « lois générales de forme statistique-probabiliste »³².

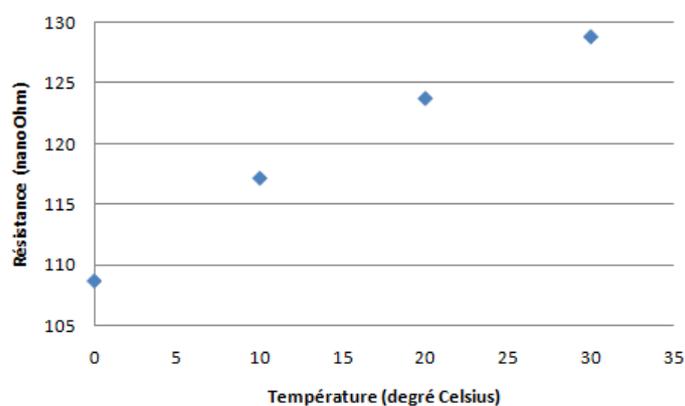
Pour discuter cet argument il est nécessaire d'entrer plus avant dans les détails concrets de l'exemple proposé par Scheffler et Hempel. Considérons que l'on dispose, après une série d'expériences, d'un ensemble fini de données indiquant la valeur de la variable « résistance électrique » d'une barre de métal de taille constante, en fonction d'une autre variable « température ». Pour une barre de fer d'un mètre de long, on obtiendrait par exemple le tableau suivant :

³¹HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 375.

³²HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 376.

	Température ($^{\circ}C$)	Résistance ($10^{-9}\Omega$)
1	0	108,7
2	10	117,2
3	20	123,8
4	30	128,9

On peut représenter ces données sous la forme de points dans un repère ayant la température en abscisse et la résistance en ordonnée, comme sur la figure ci-dessous :



Le point crucial à remarquer est que la question de la nécessité d'une loi pour prédire la résistance de la même barre de métal à une température inconnue ne se pose pas de la même manière si la température en question se trouve entre $0^{\circ}C$ et $30^{\circ}C$ ou si elle est en dehors de cet intervalle. En effet, si la valeur de la résistance à prédire correspond à une valeur de température dans l'intervalle de celles qui ont été testées expérimentalement, on a affaire à un cas d'*interpolation*. Autrement on a affaire à un cas d'*extrapolation*³³.

Or, si la prédiction que l'on cherche à réaliser consiste en une interpolation, il n'est pas nécessaire de disposer de lois, ni déterministes ni

³³L'emploi de ses termes variant de contexte à contexte, on parle aussi d'extrapolation en un sens plus large, par exemple si l'on cherche à prédire les données qu'aurait fournies la même expérience avec une barre d'un métal différent ou d'une longueur différente. L'annexe du premier chapitre est consacrée à donner une définition précise et cohérente de ces deux notions dans le cadre de cette thèse.

statistiques. Ainsi, dans notre exemple, pour prédire la valeur de la résistance pour une température de 15°C , il suffit d'appliquer une des formules mathématiques dites « d'interpolation » qui permettent de déterminer la courbe qui passe par deux points de données.

La procédure d'interpolation linéaire, par exemple, consiste à calculer la valeur recherchée en considérant qu'elle correspond à un point de coordonnées $(x; y)$ se trouvant sur le segment reliant les deux points de coordonnées $(x_1; y_1)$ et $(x_2; y_2)$:

$$y = \alpha(x - x_1) + y_1$$

Avec :

$$\alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Ainsi, pour la température de 15°C , on utilise les données 2 et 3, représentés par des points de coordonnées $(10; 117, 2)$ et $(20; 123, 8)$. On obtient : $y = 0,66(15 - 10) + 117,2 = 120,5$.

On a fixé la valeur d'une variable sans la mesurer : il s'agit bien d'une prédiction. De plus, la droite obtenue par les formules d'interpolation linéaire ne passe que par les deux points utilisés dans la procédure : ce n'est donc pas une formule qui exprime des résultats généraux. On a donc réussi à réaliser une prédiction sans recours à des énoncés nomologiques. Cet exemple prouve donc que toute prédiction ne nécessite pas des lois.

Cet exemple peut sembler trivial et peu représentatif des prédictions que l'on imagine faire un physicien. Cela révèle un biais de réflexion assez commun : on assimile souvent prédiction et extrapolation. Mais rien ne justifie ce biais : de telles procédures prédictives sont loin d'être rares, elles sont utilisées fréquemment, notamment lorsqu'une mesure dans une série d'expériences a été déficiente ou présente un résultat apparemment incohérent. Par exemple, si la donnée 3 avait indiqué une résistance de « $1,02 \cdot 10^{-9} \Omega$ » pour 20°C , une expérimentatrice avisée aurait éliminé de l'ensemble de données et recalculé par interpolation linéaire. La prédiction n'est pas une activité exclusivement théorique, consistant à déduire de nouvelles conséquences de lois scientifiques : c'est aussi une activité essentielle dans le travail des expérimentateurs pour construire des bases

de données permettant ensuite de tester des théories ou construire des modèles³⁴.

$$f(x) = 0,672x + 109,5$$

Cependant, on pourrait demander pourquoi on a choisi d'utiliser une interpolation *linéaire* et non cubique par exemple. Ne suppose-t-on pas que l'on pourrait obtenir, par régression linéaire sur toutes nos données, une loi scientifique de la forme : « pour tout métal, la électrique est proportionnelle à la température » ? On aurait ainsi implicitement utilisé une loi dans la prédiction que nous avons réalisé par interpolation. De fait, certaines lois ont été obtenues par régression linéaire, comme par exemple la loi de Hubble³⁵, qui relie le décalage spectral des galaxies à leur distance :

$$z = H_0 d / c$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide (en km/s), d la distance de la Galaxie (en Mpc mégaparsec), z le décalage spectral et H_0 une constante nommée constante de Hubble (en $km/Mpc/s$).

Le décalage spectral (aussi appelé *redshift* ou *blueshift*) est une grandeur sans dimension désignant le rapport entre la longueur d'onde d'une raie observée dans le spectre d'un objet et la longueur d'onde de cette même raie observée en laboratoire : $z = (\lambda_{observ} - \lambda_{standard}) / \lambda_{standard}$. Ce décalage peut être interprété comme un effet Fizeau-Doppler, c'est-à-dire comme un éloignement ou rapprochement de l'objet qui est la source du spectre. Ce déplacement se faisant sur l'axe entre l'observateur et l'objet qu'il observe, on parle de *vitesse radiale* de cet objet. Ainsi, la loi de Hubble relie la distance des galaxies à leur vitesse radiale et affirme que plus une galaxie est éloignée de la Terre, plus son spectre est décalé vers le rouge (*redshift*), ce qui signifie qu'elle s'en éloigne d'autant plus vite. Interprété dans le cadre de la cosmologie moderne, ce *redshift* galactique est dû à l'expansion de l'espace-temps de l'Univers, c'est-à-dire

³⁴On propose un exemple tiré des travaux de l'astronome étasunien Edwin Hubble (1889-1953) dans le commentaire de la figure 1.1.

³⁵que l'on appelle aussi relation de Slipher-Hubble pour inclure les travaux de Vesto Slipher qui précédèrent ceux de Hubble.

à l'augmentation du *facteur d'échelle* de l'Univers, le paramètre $R(t)$ responsable de la distance entre différents objets. H_0 désigne ainsi le taux d'expansion de l'Univers à notre époque de son histoire.

Or la formule $z = H_0 d/c$ fut d'abord obtenue par interpolation sur les 46 galaxies que Hubble avait observées avant 1929³⁶. Cet exemple semble montrer que les hypothèses auxquelles on aboutit au terme d'une régression statistique (ici linéaire) sont bien des énoncés nomologiques, c'est-à-dire des lois scientifiques. Mais alors, si l'on réalise une interpolation en utilisant de telles hypothèses, n'a-t-on pas réalisé une inférence prédictive en utilisant une loi, comme le soutient Hempel ?

Soutenir cette conclusion serait oublier trop vite qu'il y a un monde entre une formule issue d'une régression linéaire et une loi scientifique. En effet, une formule issue de régression est rarement efficace dans les cas d'extrapolation. Or, un énoncé nomologique ne peut servir uniquement qu'à faire des interpolations : elle doit aussi servir à faire des extrapolations. Hempel considère lui-même qu'une des caractéristiques essentielles des lois scientifiques est que « vraies ou fausses, elles ne sont pas des résumés utiles d'ensembles de données concernant des instances particulières »³⁷.

Or, lorsque l'on obtient une formule au terme d'une régression statistique, on n'a aucune assurance qu'elle soit plus qu'un « résumé utile » de données. C'est pourquoi utiliser le résultat d'une régression à des fins d'extrapolation peut amener à faire des erreurs conséquentes. Reprenons l'exemple de la résistance des métaux. Rien ne nous permet en effet d'affirmer que le comportement de la résistance des métaux est le même à température ambiante et à de très hautes ou très basses température. L'équation linéaire issue de la régression à partir des données fournies en exemple prédit ainsi que le zéro absolu (la température correspondant à une résistance nulle, car il n'y a plus d'agitation moléculaire pour gêner la circulation des charges) vaudrait $-162,9^\circ\text{C}$ ³⁸, alors que le zéro absolu

³⁶Edwin HUBBLE, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *Proceedings of the National Academy of Science* 15 (1929), p. 168–173, p. 172. Voir figure 1.1.

³⁷HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 377.

³⁸Il s'agit en effet de trouver la valeur de x pour $f(x) = 0,672x + 109,5 = 0$: $x = -162,9$

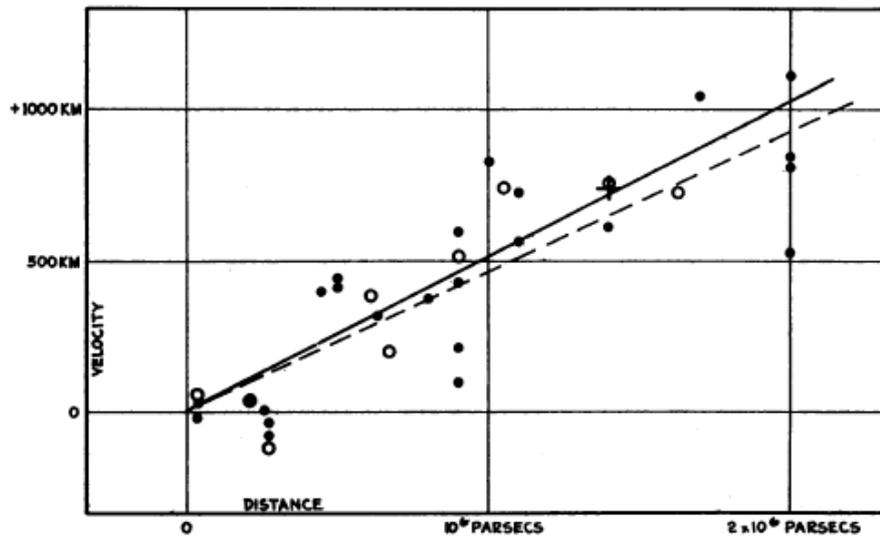


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

FIGURE 1.1 : Le graphique de Hubble mettant en lumière la relation entre la distance des galaxies et leur vélocité radiale, relation obtenue par une régression linéaire sur une base de données concernant 46 galaxies.

La vélocité radiale v_r est calculable à partir du décalage spectral z et de la vitesse de la lumière c : $v_r = z.c$. Sur ce graphique, les disques noirs et la ligne pleine représentent les galaxies dont on a calculé la vitesse individuellement, les cercles et la ligne brisée les groupes de galaxies. La croix représente la vélocité moyenne pour les 22 galaxies dont la distance n'a pas pu être évaluée individuellement. Autrement dit, la croix est le résultat d'une interpolation, c'est-à-dire d'une estimation prédictive, ce qui signifie que les données servant de base pour des régressions statistiques peuvent avoir déjà été l'objet d'une estimation prédictive.

Source : Edwin HUBBLE, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *Proceedings of the National Academy of Science* 15 (1929), p. 168-173, p. 172.

correspond à une température de $-273,15^{\circ}\text{C}$. L'échec de cette prédiction est due au fait qu'en dessous de certaines températures très basses, résistance et température ne sont plus corrélées linéairement.

Autrement dit, les formules utilisées pour réaliser des interpolations ne sont pas définies pour toutes les valeurs de la variable x , mais seulement sur l'intervalle de la zone expérimentale³⁹ : au-delà elles n'ont pas de sens physique. Elles ne peuvent pas être considérées comme des énoncés portant sur n'importe quel cas. Il est donc faux de considérer que le résultat d'une régression statistique est un énoncé nomologique au sens de Hempel.

Mais alors qu'en est-il des lois, qui comme celle de Hubble, ont été obtenues par régression statistique ? Si l'on fait attention aux détails de la démarche de Hubble, celui-ci ne désigne jamais sous le nom de « loi » la corrélation entre distance et *redshift* dans l'article où il publie pour la première fois les résultats de sa régression linéaire sur les données provenant de 46 galaxies. Il n'emploie que le terme neutre de « relation », si ce n'est dans le dernier paragraphe où il évoque la possibilité d'interpréter ses données par « l'effet de Sitter »⁴⁰.

Cet effet, sur lequel on revient plus loin dans ce chapitre, est celui d'un décalage vers le rouge des spectres lumineux dû à une expansion de l'Univers, par laquelle on interprète aujourd'hui la relation découverte par Hubble. C'est parce que l'on pouvait interpréter cette relation entre décalage spectral et distance des galaxies dans le cadre d'une théorie qui prédisait un certain effet physique et donc une loi empirique, que l'on a utilisé le terme de *loi* pour la relation de Slipher-Hubble. C'est aussi pour cela que l'on a prédit que cette relation devrait être linéaire en dehors de la zone expérimentale définie par les 46 galaxies originellement étudiées par Hubble. Autrement dit, contrairement à ce que laisse penser Hempel, une hypothèse issue de la régression linéaire n'est pas considérée comme une loi : pour qu'elle puisse faire l'objet d'extrapolations et acquérir ce statut de loi, il faut des raisons théoriques de penser qu'elle ne se limite pas à une certaine zone expérimentale.

³⁹Se reporter à l'annexe au chapitre 1 pour une définition précise de cette notion.

⁴⁰HUBBLE, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", p. 173.

Rares sont les philosophes des sciences qui ont explicitement affirmé que l'on peut réaliser des prédictions sans utiliser de lois. Un de seuls à avoir proposé des arguments en faveur de cette thèse est Rudolf Carnap (1891-1970), dans la section intitulée « Are Laws Needed for Making Predictions? » des *Logical Foundations of Probability*⁴¹.

Pour Carnap, si une loi porte sur un nombre infini d'instances, alors son degré de confirmation sera toujours nul mais cela n'empêche pas pour autant de réaliser des inférences prédictives, c'est-à-dire, dans la terminologie de Carnap, « des inférence à partir d'un échantillon à un autre échantillon [qui le ne recoupe pas] de la même population »⁴². Lorsque l'échantillon cible ne comporte qu'un individu, on parle alors de « prédiction singulière ». Si h est l'hypothèse que fait un scientifique X selon laquelle « l'individu c a la propriété M' » et e l'observation que « s_1 individus observés ont la propriété M' », alors :

X n'a pas besoin de faire un détour par la loi l comme on le croit habituellement, il peut directement aller de ses connaissances d'observation à la prédiction singulière h .⁴³

En effet, on peut réaliser une inférence prédictive singulière en n'utilisant que la fréquence relative du prédicat M' et sa largeur logique⁴⁴.

Ce résultat est, pour Carnap, un théorème logique au sens propre : il est purement analytique et *a priori*, en ce sens qu'on peut le déduire des axiomes du système de logique inductive : aucune loi n'entre ici en considération. Il fut souvent considéré comme une défense ad hoc de la théorie de la confirmation de Carnap⁴⁵ et Hempel rétorqua que le système

⁴¹Rudolf CARNAP, *Logical Foundations of Probability*, Chicago, University of Chicago Press, 1962, p. 574-575.

⁴²CARNAP, *Logical Foundations of Probability*, p. 567. Pour une analyse de la théorie de la confirmation de Carnap dans les *Logical Foundations of Probability* et des raisons qui l'amènent à attribuer une probabilité nulle aux énoncés universels dans des univers infinis de discours, voir Pierre WAGNER, "Carnap's Theories of Confirmation", *Explanation, Prediction, and Confirmation*, sous la dir. de D. DIEKS et al., Dordrecht, Springer, 2011, p. 480-483.

⁴³CARNAP, *Logical Foundations of Probability*, p. 574.

⁴⁴La propriété de « largeur logique » d'un prédicat est un des concepts centraux de la logique inductive de Carnap qu'il définit au §32. C'est une propriété qui dépend uniquement de la définition du prédicat dans un langage donné. Elle ne peut donc pas varier avec le nombre d'observations, à la différence de la fréquence relative.

⁴⁵Voir WAGNER, "Carnap's Theories of Confirmation", p. 484.

de logique inductive de Carnap faisait intervenir implicitement des lois couvrantes comme « la supposition selon laquelle la sélection des cas individuels est une expérience aléatoire dotée de certaines caractéristiques générales »⁴⁶.

Cependant, une telle hypothèse semble très éloignée de ce que Hempel considère comme une loi statistique ayant la forme « la probabilité qu'un individu qui a la propriété F ait la propriété G est de r » puisqu'elle énonce les conditions sous lesquelles certains résultats mathématiques peuvent être utilisés pour représenter une situation expérimentale et non la corrélation entre deux fréquences⁴⁷.

On peut donc conclure, comme Carnap, qu'il existe des inférences prédictives qui ne s'appuient que sur des procédures statistiques elles-mêmes dérivables de la théorie des probabilités, qui n'ont donc pas le statut de généralisations empiriques et encore moins de lois scientifiques. Il existe donc des raisonnements prédictifs qui n'ont pas de lois dans leurs prémisses, contrairement à ce que soutient Hempel.

1.3.3 Peut-on employer plusieurs théories pour réaliser une prédiction ?

Le rôle primordial des lois dans les modèles de loi couvrante a pour conséquence que la plupart des exemples d'explication donnés par Hempel ne font intervenir qu'une seule loi ou ensemble de lois qui appartiennent à la même théorie. Cette caractéristique des modèles de loi couvrante n'est ni explicitée ni problématisée par Hempel lui-même, probablement parce qu'il considère que tout ensemble d'énoncés formulable dans le même langage L , tant qu'ils sont compatibles, peut former une théorie. Hempel ne s'engage pas, en revanche, sur la question de savoir si l'on peut réaliser

⁴⁶HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 368.

⁴⁷Cette différence apparaît clairement si l'on remarque que la supposition selon laquelle la sélection de cas individuels est une expérience aléatoire ne s'applique pas comme une loi statistique au sens de Hempel. On peut par exemple *supposer* qu'une expérience a plusieurs résultats possibles même si l'on a de très bonnes raisons de croire le contraire par ailleurs. C'est ce qui arrive lorsqu'on suppose que la position d'un corps dans une boîte à un instant donné est une expérience aléatoire, alors même que l'on considère que chacun des mouvements de ce corps est déterminé par les lois de la mécanique classique et donc que cette expérience n'a qu'un seul résultat possible.

des prédictions ou des explications qui emploient des lois appartenant à des domaines différents et n'employant pas forcément le même langage.

L'exemple qu'il donne de combinaison de lois dans l'explication d'un phénomène est celui de l'explication du fait qu'un morceau de glace à la surface d'un baquet d'eau qui fond ne fait pas augmenter le niveau de l'eau. Mais si l'on essaye de formuler cette explication, on se rend compte qu'elle ne repose réellement que sur le principe d'Archimède selon lequel « Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé » En effet, de cette loi, on peut tirer la conséquence suivante :

$$g\rho_{eau}V = g.m$$

où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau liquide

V le volume du glaçon immergé dans l'eau

m la masse du glaçon. D'où l'on conclut :

$$\frac{m_{gla}}{\rho_{eau}} = V_{imm}$$

Étant supposé que la glace se transforme en eau à température ambiante et que la masse se conserve dans cette réaction, cette dernière équation est suffisante pour affirmer que le volume d'eau liquide correspondant à la masse du glaçon est égale au volume du glaçon immergé dans l'eau du baquet. Autrement dit l'eau liquide produite par la fonte du glaçon occupe le même volume que la partie immergée du glaçon, ce qui explique que le niveau de l'eau ne change pas lorsque le glaçon fond.

Dans une explication ainsi formulée c'est le principe d'Archimède qui permet de calculer le volume du système avant et après la fonte du glaçon. Le fait que la glace fonde à température ambiante et le principe de conservation de la masse ne jouent qu'un rôle auxiliaire de conditions limites et sont formulées pour garantir l'application de ce calcul au système étudié⁴⁸. On ne peut donc pas dire que ce sont des lois qui appartiennent

⁴⁸Comme on le développe dans la section suivante de ce chapitre, une des principales limites des modèles de loi couvrante est qu'ils n'identifient que deux groupes d'énoncés

à une théorie ou à un domaine différent que le principe d'Archimède.

Cependant, des exemples tout aussi simples que celui de Hempel révèlent des conjonctions de lois venant de théories différentes. Prenons le cas de la chute des corps, par exemple d'une carapace de tortue sur le crâne d'Eschyle. La vitesse de la carapace au moment de son contact avec le sol (ou Eschyle) est donnée par la formule $v = gt$. Celle-ci est obtenue par déduction à partir de la conjonction de la troisième loi de Newton et de la gravitation universelle. Par définition, lors d'une chute libre, la seule force qui s'exerce sur un mobile est l'attraction de la pesanteur :

$$ma = mg$$

$$a = g$$

$$v = gt$$

En remplaçant dans cette formule les valeurs de g et de t qui sont celles du système étudié, on obtient un « modèle » de ce système. Ce modèle permet de calculer la valeur de v et ainsi de prédire la vitesse de la carapace au moment de son impact avec Eschyle. On dit que c'est un modèle théorique de chute, car il n'a pas été construit en ajustant une courbe à partir de données mais en appliquant directement certaines lois fondamentales et que c'est un modèle newtonien car ces lois sont celles d'une même théorie, la théorie de la gravitation newtonienne.

Cependant il est très peu probable qu'un tel modèle soit satisfaisant si la hauteur de la chute est importante et qu'elle a lieu dans l'atmosphère terrestre, où les chutes ne sont pas « libres » mais font intervenir d'autres forces. En effet, la résistance de l'air a pour effet de s'opposer à la chute et de faire tendre le système vers une vitesse limite. On représente cet effet en changeant la formule du modèle théorique pour rajouter un composant qui est proportionnel au carré de la vitesse de chute :

$$v = gt + kv^2$$

dans les prémisses d'un argument prédictif : les lois et les conditions antécédentes. Ils ne font aucune place pour les hypothèses auxiliaires et les conditions aux limites. Voilà pourquoi, dans ses exemples, Hempel traite ces hypothèses auxiliaires comme des lois ou des conditions antécédentes.

où k est une constante qui dépend de l'objet qui chute.

D'après le philosophe des sciences Elliott Sober on a alors affaire à un modèle « pluraliste », en ce sens qu'il décrit des effets qui relèvent de causes et de théories différentes :

Une boule de bowling et une plume ont des trajectoires différentes lorsqu'elles sont lâchées à la surface de la Terre parce que la résistance de l'air a une influence importante sur l'une et non sur l'autre. Les physiciens et les biologistes étudient tous quelles forces ont une influence significative sur ce qui arrive. Et quand on en vient aux plumes, la physique nous apprend à être pluraliste – à voir à la fois la gravité et la résistance comme d'importantes influences sur la trajectoire résultante⁴⁹.

Si une scientifique cherche à obtenir un modèle prédictif utilisable dans un cas concret de chute, cette affirmation d'E. Sober est justifiée, puisque la formule $v = gt + kv^2$ ne permet de prédire ni la vitesse ni l'instant de la chute de la carapace si l'on ne connaît pas la valeur de k . Or, ce paramètre est, pour la théorie de la gravitation de Newton, un paramètre libre : il n'existe pas de loi permettant de fixer sa valeur.

Pour déterminer la valeur de ce paramètre libre en restant dans le cadre de cette théorie, il faut réaliser une série d'expériences de chute libre avec une carapace, puis ajuster la formule $v = gt + kv^2$ aux données. Si l'on veut fixer ce paramètre sans avoir à recourir à une série d'expériences sur les carapaces de tortue, il faut être capable de calculer k . Le coefficient de résistance de l'air de la carapace peut être déterminé à l'aide de cette formule :

$$k = \frac{1}{2} C_{carapace} \rho_{air} S$$

où $C_{carapace}$ est le coefficient de résistance aérodynamique de la carapace (aussi appelé « coefficient de traînée »),

ρ_{air} la masse volumique de l'air,

⁴⁹Elliott SOBER, "Two outbreaks of lawlessness in recent philosophy of biology", *Philosophy of Science* 64 (1997), p. 458–467, p. 461.

et S le maître couple de la carapace (la section de la carapace perpendiculaire à l'axe du mouvement).

Or, $C_{carapace}$ n'est pas un symbole qui a une signification dans la théorie newtonienne : c'est une grandeur qui est définie en dynamique des fluides⁵⁰. Le modèle de la chute d'un corps avec résistance de l'air est donc bien « pluraliste » au sens d'E. Sober, puisqu'il collige des éléments d'origine théorique différentes.

Certes, définir le domaine d'une théorie physique n'est pas chose aisée : une théorie de la gravitation semble par exemple devoir s'appliquer à tous les phénomènes physiques. Mais il semble difficile de contester que la dynamique des fluides porte sur des phénomènes qui demandent de prendre en compte d'autres forces et effets que ceux qui sont définis par la théorie de la gravitation. Même si l'on définit le domaine d'une théorie à la manière des logiciens pour qui le domaine de la théorie T consiste en l'ensemble des éléments et n-uplets sur lesquels on quantifie, il ne semble pas que l'on puisse identifier le domaine de la théorie de la gravitation newtonienne et de la dynamique des fluides, puisque certains prédicats de cette dernière ne sont pas définis ni définissables dans la théorie de la gravitation newtonienne.

Le cas de la chute des corps illustre ainsi un point important : pour fixer la valeur d'une ou plusieurs variables d'un système, on est souvent amené, même pour des cas apparemment simples, à utiliser l'une des deux procédures suivantes :

- Soit on construit une représentation théorique du phénomène à partir des équations fondamentales d'une théorie déjà existante. En fonction des écarts constatés entre le comportement prédit du phénomène par ce modèle et son comportement observé, on ajuste le modèle (souvent en lui rajoutant un paramètre comme celui de résistance de l'air dans notre exemple), ce qui permet d'en prédire les occurrences futures. Dans un tel cas, la prédiction ne peut venir qu'après un ajustement des équations aux données.

⁵⁰En effet, ce coefficient est exprimé selon le nombre de Reynolds du fluide. Or ce nombre sans dimension est le rapport entre l'inertie et la viscosité d'un fluide qui apparaît dans les équations de Navier-Stokes, les équations fondamentales de la dynamique des fluides.

- Soit on construit une représentation concrète du phénomène, en cherchant rendre compte de ses différents aspects. Si ces aspects font intervenir des objets qui appartiennent à des domaines différents, il est alors nécessaire de combiner des lois provenant de théories différentes.

Ces différentes procédures définissent des structures de raisonnements prédictifs différents reposant pour la première sur des lois, la seconde sur un modèle (et que nous examinons en détail dans le chapitre suivant de cette thèse). Stéphanie Ruphy a montré, dans *Pluralismes scientifiques* que, non seulement cette forme de modélisation est courante en science, mais qu'il existe en outre des cas de « représentations incompatibles » d'un même phénomène où différentes modélisations mènent à des propositions inconciliables⁵¹. Autrement dit, l'activité prédictive est doublement pluraliste : elle est pluraliste (au sens d'E. Sober) parce ce qu'elle combine différentes approches théoriques *compatibles* dans la modélisation d'un même phénomène et elle est pluraliste (au sens plus fort de pluralisme incompatible de S. Ruphy) parce que pour prédire le comportement d'un système on peut être amené à en fournir des représentations différentes et incompatibles (on donne un exemple d'une telle situation dans ce qui suit).

1.3.4 Ne prédit-on que des événements particuliers ?

La question de l'objet des prédictions est, comme on l'a vu, largement liée à celle de savoir si les prédictions portent sur l'avenir. En effet, avoir une caractérisation temporelle des prédictions scientifiques implique, comme le fait Hempel de refuser que l'on puisse donner un sens à la notion de « prédiction de lois » :

Les explications de lois ne sont pas des prédictions potentielles puisque les lois expriment des uniformités hors du temps et donc ne font référence à aucun temps particulier, que ce soit le passé, le présent ou le futur⁵².

⁵¹Stéphanie RUPHY, *Pluralismes scientifiques : enjeux épistémiques et métaphysiques*, Paris, Hermann, 2013, p. 169.

⁵²HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 368.

Cependant, si l'on considère que les prédictions ne concernent pas forcément des faits postérieurs au présent, alors le spectre des objets de prédiction s'élargit considérablement.

Dans le cas de la découverte d'un phénomène ou d'une loi empirique après sa dérivation à partir d'une nouvelle théorie, il semble légitime de parler de « prédictions de nouvelles lois » comme le fait Carnap dans le chapitre 25 des *Philosophical Foundations of Physics*. En effet, Carnap adopte, dans le premier chapitre consacré aux lois, aux explications et aux prédictions, un modèle de prédiction structurellement identique à celui de Hempel, à la différence que les faits prédits ne sont pas forcément des événements futurs mais peuvent aussi être des faits inconnus⁵³. Ainsi, lorsqu'il aborde la question de la confirmation des lois théoriques dans le chapitre 25, il est naturel pour lui de considérer que la dérivation d'une loi inconnue avant cette dérivation est une prédiction, bien que cette loi « exprime une uniformité hors du temps » :

Si les lois empiriques peuvent être confirmées, cela procure une confirmation indirecte à la théorie. De nombreuses lois empiriques concernant les gaz étaient connues, bien sûr, avant que la théorie cinétique des gaz ne fut développée. La théorie a fourni une explication de ces lois. De plus, elle a mené à des lois empiriques *auparavant inconnues*.

Le pouvoir d'une théorie de *prédire de nouvelles lois* empiriques est exemplifié de manière frappante par la théorie de l'électromagnétisme⁵⁴.

Ce passage montre que Carnap n'a pas de scrupule à parler de prédiction de nouvelles lois, ni à considérer que ce type de prédiction joue un rôle dans la « confirmation indirecte » de la théorie.

⁵³Rudolf CARNAP, *Philosophical foundations of physics : an introduction to the philosophy of science*, New York, Basic Books, 1966, p. 17 Carnap considère dans cet ouvrage que l'on peut réaliser une prédiction lorsque l'on dispose d'un énoncé de la forme $\forall x(Px \rightarrow Qx)$ et d'un individu a qui satisfait la propriété P . Il suffit que le fait décrit par l'énoncé Qa ne soit pas connu avant la dérivation pour qu'on ait affaire à une prédiction et non à une explication, que ce fait soit passé, présent ou futur.

⁵⁴ CARNAP, *Philosophical foundations of physics*, p. 241. Je souligne

Reconnaître la possibilité de prédictions non seulement d'occurrences de phénomènes mais aussi de nouveaux phénomènes ou de nouvelles lois est d'importance cruciale dans le contexte de la confirmation, mais aussi du réalisme scientifique, où ces prédictions de nouvelles lois jouent aussi un rôle bien plus important que la prédiction d'une occurrence future d'une loi déjà connue.

J. Worrall insiste explicitement sur cette question lorsqu'il soutient sa version du réalisme scientifique, le réalisme structural. Selon lui, seules comptent comme « matures », c'est-à-dire susceptibles d'être approximativement vraies, les théories qui ont réalisé des prédictions de *nouvelles généralisations empiriques* :

Le succès d'une théorie dans la prédictions d'événements particuliers d'un type déjà connu n'est pas, en soi, suffisant pour nourrir « l'argument du miracle » en faveur de cette théorie. Les théories, dans la plupart des cas, accumulent ce genre de succès, car, Popper ou non, les scientifiques généralisent, par des inductions inconscientes, les résultats d'expériences bien contrôlées qui ont jusqu'ici toujours donné les mêmes résultats. Mais le succès de telles manœuvres inductives ne parle en faveur de la probable vérité d'aucune théorie.

Le type de succès prédictif que l'on semble obtenir en éclaircissant l'intuition sous-jacente à « l'argument du miracle » est une forme bien plus forte, bien plus frappante de succès prédictif. *Ce n'est pas qu'une nouvelle instance d'une ancienne généralisation empirique, mais une toute nouvelle généralisation qui découle d'une théorie et qui finit par être confirmée* ⁵⁵.

Ainsi, si l'on restreint les prédictions au cas de prévisions d'occurrences futures de phénomènes comme le fait Hempel, on élimine la possibilité de parler de prédictions qui confirment des théories ou qui les rendent approximativement vraies. Il faut admettre que l'on puisse parler de prédictions de phénomènes et de lois si l'on veut pouvoir rendre

⁵⁵WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", p. 114. Je souligne.

compte de tous les rôles qu'on a pu donné aux prédictions.

Cette distinction entre prédictions de l'occurrence d'un phénomène et prédictions de nouvelles généralisations empiriques peut sembler recouper la distinction faite par James Bogen et James Woodward entre *données* et *phénomènes*, dans leur article « Saving the Phenomena » paru en 1988. Or, pour J. Bogen et J. Woodward, on ne prédit que des phénomènes et jamais des données.

En effet, les données correspondent à ce qui est directement observé ou mesuré, tandis que les phénomènes sont ce qui est expliqué et prédit par les théories. Ils sont *inférés* sur la base des données, en considérant qu'il s'agit du processus qui a généré ces données. Si l'on mesure par exemple la température de fusion du plomb à plusieurs reprises, on obtient différents résultats en lisant la valeur indiquée par le thermomètre : ce sont les données, que l'on peut représenter sous la forme de points dans un repère. Si l'on estime que les différences entre ces résultats sont dues à de petites erreurs de mesures non corrélées, on peut considérer que la moyenne des données représente la « vraie » valeur, c'est-à-dire celle qui va être retenue par les scientifiques comme la température à laquelle le phénomène de fusion du plomb se produit et dont on va chercher à rendre compte en utilisant une théorie physico-chimique. Il se peut que cette température n'ait jamais été observée directement par l'expérimentateur et pourtant c'est bien cette valeur qui fait l'objet d'une prédiction :

Bien que le vrai point de fusion est certainement *inféré* ou *estimé* des données observées, sur la base de la théorie des inférences statistiques et de diverses suppositions, l'énoncé « le plomb fond à 327.5 ± 0.1 °C » – la forme du rapport expérimental de la détermination du point de fusion peut prendre ne décrit pas ce qui est observé ou perçu. [...] Aucune théorie ne peut prédire ou expliquer précisément un résultat qui dépend de la convergence de si nombreux facteurs variables et éphémères⁵⁶.

⁵⁶James BOGEN et James WOODWARD, « Saving the phenomena », *The Philosophical Review* 97.3 (1988), p. 303–352, p. 308.

Si J. Bogen et J. Woodward affirment que seuls les phénomènes et non les données sont prédits et expliqués scientifiquement, c'est parce qu'ils adhèrent à une certaine conception de l'explication scientifique proche de la théorie unificationniste de Philip Kitcher qu'ils développent dans la quatrième section de leur article, d'après laquelle expliquer consiste à unifier des éléments divers sous une même hypothèse. Or, d'après J. Bogen et J. Woodward, « les explications de données, lorsque l'on peut en donner, ne présentent pas le degré de généralité requis pour représenter une unification théorique »⁵⁷. Cette condition est peut-être nécessaire pour parler d'explication, mais elle est clairement trop forte pour identifier une prédiction : comme on l'a vu dans la section 1.3.2, il est tout à fait possible de réaliser des prédictions de données par des procédures d'interpolation.

Ainsi, même s'il est parfaitement justifié de distinguer entre des données et le phénomène sensé les avoir produits, il ne semble pas requis de limiter l'objet des prédictions à ces derniers. Il semble plus cohérent d'admettre, comme le font les philosophes des sciences Heather Douglas et Paul Magnus dans leur état de la recherche sur les nouvelles prédictions, que les données et les phénomènes constituent deux niveaux de l'activité scientifique et que chacun peut donner lieu à des prédictions⁵⁸.

Les travaux de Hempel et de J. Bogen et J. Woodward ont en commun de chercher à identifier un seul objet exclusif des prédictions et explications théoriques. En accord avec H. Douglas et P. Magnus, il ne me semble pas nécessaire de mener à bien ce projet pour identifier les structures logiques des arguments prédictifs.

En effet, tant qu'une variable admet une définition⁵⁹, rien n'empêche

⁵⁷BOGEN et WOODWARD, "Saving the phenomena", p. 326.

⁵⁸Heather DOUGLAS et Peter MAGNUS, "State of the Field, Why Novel Prediction Matters", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 44.4 (2013), p. 580–589, p. 582 H. Douglas et P. Magnus font explicitement références aux travaux de J. Bogen et J. Woodward pour définir la notion de phénomène. On revient plus en détail sur cette analyse des niveaux de prédictions dans le septième chapitre de cette thèse, section 7.3.4.

⁵⁹Cette définition n'a pas à être une définition explicite, mais peut être une définition implicite consistant à relier cette variable d'une manière ou d'une autre à d'autres variables, ce qui est une condition remplie par toutes les variables qui peuvent faire l'objet d'une prédiction. Sur les différentes formes de définitions, voir Pierre WAGNER, *Définition (A)*, 2017, URL : <http://encyclo-philo.fr/definition-a-2/>.

a priori de prédire sa valeur pour un ensemble donné de valeurs d'autres variables. Le calcul des valeurs d'une ou de plusieurs variables peut ainsi donner lieu à la prédiction d'un événement à un instant ponctuel, du comportement d'un système sur une période donnée, ou à la corrélation stable entre les valeurs de plusieurs variables.

Il y a trois avantages à ne pas fixer une cible privilégiée aux prédictions mais à utiliser la notion de variable pour décrire cette pratique scientifique. Le premier est que ce vocabulaire est celui de la statistique et donc celui de nombreuses recherches scientifiques et philosophiques employant les méthodes statistiques. Le second est que la notion de variable est plus large que celle à laquelle on la restreint souvent de « variable quantitative ». Il est tout à fait possible de définir des variables dont les valeurs sont discrètes et correspondent à des noms ou des états de chose pour pouvoir ensuite constituer des bases de données et les analyser statistiquement. Employer la notion de variable ne nous restreint donc pas à ne parler que des prédictions des sciences mathématisées.

Le troisième avantage est le plus important : le langage des variables permet d'éviter de prendre position sur la question des systèmes imprédictibles. D'après certains philosophes, comme Nancy Cartwright, il existerait deux types de systèmes physiques dans le monde : des systèmes bien ordonnés (qu'elle appelle des « machines nomologiques ») comme le système solaire auxquels on peut appliquer les lois de la physique pour prédire avec exactitude leur évolution et des systèmes désordonnés comme par exemple un billet de banque soulevé par le vent dans un square que l'on ne peut pas décrire avec nos théories physiques et dont l'évolution ne serait pas prédictible⁶⁰.

S. Rupy a proposé une expérience de pensée pour montrer que cette distinction n'est pas absolue mais dépend des attentes épistémiques de ceux qui décrivent ces systèmes. Elle propose d'imaginer un extraterrestre en orbite autour d'un petit astéroïde. Pour lui, le système solaire est un système désordonné ne présentant que peu de régularités. En revanche, s'il s'intéresse aux billets de banque à la surface de la Terre mais que

⁶⁰Nancy CARTWRIGHT, *The Dappled World : A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999, p. 27.

la seule variable qui lui est accessible ou qui lui semble pertinente est la hauteur du billet de banque, alors il s'exclamera : « Voici une belle machine nomologique pour laquelle les lois de Newton s'appliquent, à chaque fois qu'un billet de banque est soulevé par le vent, dix minutes après, le billet est sur le sol »⁶¹.

Cette expérience de pensée permet ainsi de montrer que selon la variable que l'on essaye de prédire — et ce que l'on attend de cette prédiction — un même phénomène peut paraître prédictible ou imprédictible. Comme l'écrit S. Rupy :

Pour un système, *être ou non une machine nomologique dépend du type de questions que l'on se pose à propos du système*, en particulier du degré de précision et de certitude attendu des réponses⁶².

C'est pourquoi on n'essayera pas dans cette thèse d'identifier une classe de systèmes *chaotiques* qui échapperaient à toute prédiction, parce que cette entreprise dépend essentiellement des buts et des projets des scientifiques eux-mêmes et ne semble pas pouvoir faire l'objet d'une définition philosophique.

Ainsi, le principal intérêt de parler de prédiction en termes de variables est d'accepter l'idée qu'un même système peut être considéré comme prédictible ou non (et d'accepter par là-même qu'il puisse y avoir différentes représentations incompatibles de ce système) selon les variables auxquelles on s'intéresse.

On pourrait cependant objecter que cette manière de parler des prédictions en termes de « variables » et de « valeurs » de variables a pour inconvénient qu'il est impossible de parler de prédiction d'existence d'objet. On ne pourrait dire par exemple que « l'astronome Urbain Le Verrier (1811-1877) a prédit l'existence et la position de la planète Neptune en septembre 1846 ».

Pourtant, lorsque Le Verrier, présente les recherches qui l'ont amené à la prédiction de Neptune devant l'Académie des Sciences, il le fait en ces termes :

⁶¹RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 127-128.

⁶²RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 128.

Nous sommes ainsi conduits à nous poser la question suivante :

Est-il possible que les inégalités d’Uranus soient dues à l’action d’une planète, située dans l’écliptique, à une distance moyenne double de celle d’Uranus ? Et, s’il en est ainsi, *où est actuellement située cette planète ? Quelle est sa masse ? Quels sont les éléments de l’orbite qu’elle parcourt ?*⁶³

Il s’agit bien pour Le Verrier de prédire l’existence d’un objet – une planète – en prédisant les valeurs des variables qui définissent cet objet dans une théorie donnée – l’astronomie. En effet, pour un astronome du XIX^e siècle une planète est décrite par huit variables :

- Ses six « paramètres orbitaux », c’est-à-dire les variables permettant de décrire l’orbite elliptique de la planète ⁶⁴.
- Sa période.
- Sa masse.

Prédire l’existence d’une planète, c’est prédire les valeurs de ces huit paramètres, qui définissent intégralement ce qu’est une planète pour l’astronomie que pratique Le Verrier, c’est-à-dire la mécanique céleste. Il n’est donc pas impossible de rendre compte des raisonnements prédictifs amenant à prédire l’existence d’objets en termes de variables et de valeurs de ces variables.

Voilà pourquoi il ne m’a pas semblé nécessaire, dans l’introduction générale de cette thèse, de déterminer une et unique cible privilégiée des prédictions scientifiques (les phénomènes, les événements, les lois, les scénarii, les trajectoires des systèmes dans l’espace des phases, etc.) mais plutôt d’admettre que l’on peut, dans une large mesure, parler de ces différentes cibles et des différents raisonnements prédictifs avec le

⁶³Urbain LE VERRIER, “Recherches sur les mouvements d’Uranus”, *Comptes rendus de l’Académie des sciences* 22 (séance du 1er juin 1846), p. 907–918, p. 915. Je souligne.

⁶⁴Le demi-grand axe de l’ellipse, son excentricité, l’inclinaison du plan de l’ellipse par rapport à l’écliptique (le plan de l’orbite terrestre), la longitude du nœud ascendant, l’angle entre la ligne des nœuds et le périhélie et l’instant de passage au périhélie.

langage des variables – quitte à admettre une acception très large de ce terme.

Dans cette section, on a montré que les modèles de loi couvrante ne pouvaient représenter l'unique structure des raisonnements prédictifs possible, parce que leurs quatre caractéristiques sont trop restrictives et ne peuvent être des conditions nécessaires pour qu'une série d'inférences soit considérée comme une prédiction. Nous avons en effet vu des cas de prédictions qui ne portent sur des phénomènes ni futurs ni inconnus, des prédictions qui n'utilisent pas de lois scientifiques, des prédictions qui combinent plusieurs théories et enfin des prédictions qui portent sur d'autres objets que des occurrences particulières. Il existe donc des genres de prédictions différents de ceux représentés par les modèles de loi couvrante, que l'on étudie dans le deuxième chapitre de cette thèse. Dans la section suivante, on examine si les modèles de loi couvrante sont cohérents et peuvent représenter un type de prédiction particulier, c'est-à-dire si leurs quatre caractéristiques sont des conditions suffisantes pour qu'un raisonnement soit prédictif.

1.4 Les modèles de loi couvrante posent-ils des conditions suffisantes pour la structure des prédictions ?

L'objectif de cette section est de montrer que les modèles de loi couvrante représentent une conception incohérente des raisonnements prédictifs et ne définissent donc pas des conditions suffisantes pour capturer la conception classique des prédictions guidées par des lois. En effet, une condition importante pour réaliser une prédiction à partir de lois couvrantes est l'usage d'un certain type d'hypothèse auxiliaire : les conditions aux limites. Or ces conditions aux limites sont incompatibles avec la conjonction de deux des exigences de Hempel : que les prédictions portent sur le futur et que toutes les prémisses des raisonnements prédictifs soient vraies.

1.4.1 Conditions aux limites et clauses *ceteris paribus*

Une des caractéristiques les plus discutées des modèles de loi couvrante est le critère d'*adéquation empirique* selon lequel « les énoncés apparaissant dans l'explanans doivent être vrais »⁶⁵. On peut montrer que les quatre caractéristiques communes aux modèles de loi couvrante indiquées dans la section 1.1.1 sont incompatibles avec cette condition d'adéquation empirique. En effet, comme le reconnaît Hempel lui-même, si les arguments prédictifs se conforment à ces quatre caractéristiques, ils doivent comporter dans leurs prémisses non seulement des conditions antécédentes (ou initiales) mais aussi des « conditions aux limites entre t_0 et t_1 » qui « spécifient les influences extérieures agissant sur le système durant la durée en question. » Ainsi, « les arguments prédictifs requièrent aussi des prémisses concernant le futur – par exemple l'absence d'influences extérieures au système telle que la collision de Mars et d'une comète inattendue »⁶⁶.

Or, ces conditions aux limites jouent, dans les raisonnements prédictifs, le rôle que jouent les clauses *ceteris paribus* dans les explications à partir des lois physiques : elles garantissent que des systèmes auxquels s'appliquent certaines lois mais qui sont perturbés par l'influence des facteurs extérieurs, qui ne sont pas décrits par ces lois, ne représentent pas des *contre-exemple* aux lois susceptibles de les réfuter. Ainsi, si l'on adjoint à la loi « tous les corps chutent avec une accélération » la mention *ceteris paribus*, qui signifie « toutes choses égales par ailleurs », une plume qui chute dans l'atmosphère terrestre et rencontre la résistance de l'air ne sera pas une expérience susceptible de réfuter cette loi, puisque la présence de l'influence perturbante de l'air viole la clause *ceteris paribus*.

Depuis les premiers travaux de N. Cartwright sur la question dans *How the Laws of Physics Lie*, de nombreux philosophes des sciences —

⁶⁵HEMPEL et OPPENHEIM, “Studies in the Logic of Explanation”, p. 137. Il ne faut pas entendre par l'emploi de l'adjectif « vrai » que ces énoncés sont en adéquation avec une forme de réalité non-observable, mais uniquement que « de nombreuses preuves actuellement disponibles rendent hautement probable que l'explanans soit vrai ».

⁶⁶HEMPEL, “Aspects of Scientific Explanation”, p. 368.

dont Hempel⁶⁷ — se sont penchés sur les problèmes consistant à affirmer qu’une loi physique ne s’applique à un système que *ceteris paribus*. Sans une telle restriction les lois physiques sont clairement fausses. Mais avec une telle restriction, les lois semblent trivialement vraies et dénuées de tout pouvoir explicatif. Cela amène N. Cartwright à considérer qu’expliquer un phénomène concret et énoncer des lois vraies sont « des fonctions complètement différentes et devraient rester distinctes »⁶⁸. Cependant, la plupart de ces recherches concernent les problèmes que posent ces clauses *ceteris paribus* dans une optique d’explication et non de prédiction.

Or, le cas des prédictions et des conditions aux limites est différent et amène à adresser une objection spécifique aux modèles de loi couvrante, objection qui n’a jusqu’à présent, été soulevée que par P. Vickers dans le cas de la théorie de la diffraction de Kirchhoff⁶⁹. Si l’on exige, comme le font les modèles de loi couvrante, qu’une prédiction ait pour objet un événement postérieur au moment t_p où elle est réalisée, alors il est nécessaire de disposer d’une condition aux limites qui porte sur un intervalle $[t_0 - t_1]$ tel que $t_p < t_1$. Cela implique que cette condition aux limites n’est jamais confirmée directement par une expérience qui permette de constater qu’il n’y a pas eu d’influence sur le système étudié, car si c’était le cas il faudrait que $t_p > t_1$ et l’on n’aurait plus affaire à une prédiction. Ainsi, lorsque l’on fait une prédiction qui porte sur le futur, on utilise forcément une condition aux limites qui viole le critère d’adéquation empirique : les modèles de loi couvrante de prédictions sont donc incohérents.

On peut certes avoir de bonnes raisons d’admettre certaines conditions aux limites, en apportant des arguments théoriques en leur faveur. Il est par exemple raisonnable d’admettre que, dans l’état de nos connaissances scientifiques, un gaz placé dans une cuve hermétique constitue un système isolé. Mais rien ne permet d’être certain que cette condition

⁶⁷Carl HEMPEL, “Provisoes : A problem concerning the inferential function of scientific theories”, *Erkenntnis* 28.2 (1988), p. 147–164.

⁶⁸Nancy CARTWRIGHT, *How the Laws of Physics Lie*, New York, Clarendon Press, 1983, p. 44.

⁶⁹Voir Juha SAATSI et Peter VICKERS, “Miraculous success? Inconsistency and untruth in Kirchhoff’s diffraction theory”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 62.1 (2010), p. 29–46, et VICKERS, “A Confrontation of Convergent Realism”.

sera vérifiée lors d’une prochaine expérience⁷⁰ : comme le fait remarquer Carnap, puisqu’il est impossible de tester l’absence de perturbations de tous les facteurs susceptibles d’influencer un système, les hypothèses qui posent les conditions aux limites font l’objet d’une *décision* et non d’une *preuve*⁷¹.

Ainsi, puisqu’il est difficile, voire impossible, d’écarter toutes les sources possibles de perturbation du système, on ne peut réaliser de prédiction sans recourir à des conditions aux limites que l’on admet sans preuves suffisantes pour être certain de leur vérité. Même lorsque ces hypothèses ne sont pas reconnues comme fausses, elle violent le critère d’adéquation empirique de Hempel. Mais on peut même aller plus loin et montrer, à l’aide de deux exemples, que les conditions aux limites utilisées dans des raisonnements prédictifs sont parfois explicitement fausses ou fictionnelles⁷².

1.4.2 Hypothèses auxiliaires et conditions aux limites en cosmologie : le cas de l’effet de Sitter

Un exemple frappant de cette utilisation d’hypothèses considérées comme fausses pour servir de condition aux limites afin de dériver des prédictions se rencontre en cosmologie, lorsqu’il s’agit de prédire la relation de Slipher-Hubble entre la distance des galaxies et leur décalage spectral vers le rouge. La prédiction de ce phénomène est connu sous le nom d’effet de Sitter, car il fut prédit par l’astronome et physicien néerlandais Willem de Sitter (1872-1934) en 1917⁷³.

Pour réaliser cette prédiction, il faut appliquer à l’ensemble de l’espace-temps les équations de champ d’Einstein — les équations fondamentales de la relativité générale — qui relie la structure de l’espace-temps aux masses qui prennent place dans cet espace-temps.

⁷⁰Sinon, il n’y aurait pas de problème de l’induction !

⁷¹CARNAP, *Philosophical foundations of physics*, p. 44-45.

⁷²On discute en détail le rôle des idéalizations dans les succès prédictifs dans le chapitre 8. Ici, c’est l’existence en particulier de conditions aux limites qui nous intéresse. Sur cette notion, se reporter aux travaux de P. Vickers déjà cités et Peter VICKERS, *Understanding Inconsistent Science*, Oxford, Oxford University Press, 2013.

⁷³Willem DE SITTER, “On the curvature of space”, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings* 20 (1917), p. 229–243.

Cependant, puisqu'il s'agit d'étudier l'espace-temps dans sa globalité et non son comportement local aux alentours d'un nombre restreint de masses, il faut faire une première simplification en admettant ce que l'on appelle le *principe cosmologique*⁷⁴, selon lequel l'Univers est *isotrope* et *homogène*, c'est-à-dire qu'il présente les mêmes caractéristiques quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe (isotropie) et quelle que soit la position de l'observateur (homogénéité).

Si l'on peut constater, en pointant nos télescopes dans différentes directions, que l'Univers est globalement isotrope, nous n'avons pas de preuve que l'Univers est homogène, car cela demanderait de pouvoir prendre la place d'observateurs dans d'autres galaxies que la nôtre, ce que nous ne sommes pas en mesure de faire. Le principe cosmologique est donc bien une supposition non prouvée sur les caractéristiques de l'Univers, que les scientifiques considèrent comme telle et non une loi confirmée empiriquement comme le principe d'Archimède.

De plus, si l'on s'en tient à une formulation simple du principe cosmologique, celui-ci semble en contradiction patente avec de nombreuses observations, car l'Univers n'apparaît pas isotrope mais présente au contraire des structures variées (galaxies, amas de galaxies, nuages de gaz et de poussières) selon les directions dans lesquelles on l'observe. L'Univers n'est isotrope qu'à grande échelle (pour des échelles de 50 mégaparsec⁷⁵ environ) : le principe cosmologique est donc une forme d'approximation ou d'idéalisation, utile avant tout parce qu'elle permet de trouver une solution aux équations d'Einstein.

De plus, pour résoudre ces équation, a admis une hypothèse supplémentaire : une densité nulle⁷⁶. Autrement dit, l'Univers de est vide, il ne contient aucune masse. Cette supposition permet précisément d'imposer une condition aux limites puisque les particules de cet Univers n'ayant pas de masse elles ne peuvent pas perturber la courbure et l'expansion de l'espace-temps.

⁷⁴Voir Jayant NARLIKAR, *An Introduction to Cosmology*, Cambridge University Press, 2002, p. 109. Les équations d'Einstein et l'utilisation du principe cosmologique pour les résoudre sont développées dans l'annexe du chapitre 3.

⁷⁵Un parsec correspond à $3,085 \cdot 10^{16} m$, soit environ 3,26 années-lumières.

⁷⁶On revient, dans le troisième chapitre, section 3.1.2 sur les raisons qui ont amené à faire une telle hypothèse.

Or, dans un Univers de les sources lumineuses donnent l'impression de s'éloigner d'autant plus vite d'un observateur qu'elles sont éloignées de lui : leur spectre présente donc un décalage vers le rouge caractéristique d'un effet Doppler-Fizeau proportionnel à leur distance. La solution de permet donc bien de prédire la relation de proportionnalité entre distance et décalage spectral des galaxies connue sous le nom de loi de Hubble.

Il est clair que la supposition que l'Univers est vide de toute matière est fautive et reconnue comme telle par tout un chacun. Il est clair aussi qu'une telle supposition entre en contradiction avec d'autres énoncés qui font partie du même raisonnement prédictif : s'il y a des sources lumineuses qui s'éloignent, c'est qu'il existe des étoiles ou des galaxies lointaines jouant ce rôle de source lumineuse, étoiles ou galaxies qui ne sont pas de masse nulle. Il est clair enfin que l'hypothèse de de Sitter est embarrassante pour les scientifiques qui l'ont utilisée et l'utilisent encore⁷⁷.

Cependant, il est tout aussi clair que le caractère faux, contradictoire et embarrassant de cette hypothèse n'a pas empêché de l'utiliser pour réaliser des prédictions et qui ont été confirmées par des observations, notamment celles de Hubble. Cet exemple montre donc que les conditions aux limites comme le principe cosmologique ou l'hypothèse de de Sitter sont nécessaires à la réalisation des prédictions et d'autant plus nécessaires que ces prédictions reposent sur l'utilisation de lois scientifiques universelles comme les équations d'Einstein. En effet, une possibilité pour échapper à la nécessité de faire appel à des conditions aux limites serait de représenter les perturbations extérieures au système, afin de prendre en compte leur influence dans la réalisation de la prédiction. Mais comme on l'a vu avec l'exemple de la modélisation de la résistance de l'air dans la prédiction de la chute d'un corps (section 1.3.3), prendre en compte

⁷⁷Ce passage du manuel de cosmologie de Cambridge écrit par le cosmologiste Jayant Vishnu Narlikar exprime bien, dans sa formulation, tout l'embarras qu'il peut y avoir à utiliser une hypothèse clairement aberrante pour aboutir à une prédiction confirmée : « L'Univers de montra que des espaces-temps vides pouvait être obtenus comme solution de la relativité générale. [...] Bien que la propriété d'être vide de l'Univers de fût embarrassante, sa propriété d'expansion s'avéra contenir un germe de vérité. En effet, avant la fin de la troisième décennie du XX^e siècle, les observations de Hubble et Humanson indiquèrent que l'Univers n'est pas statique mais bien en expansion. »NARLIKAR, *An Introduction to Cosmology*, p. 106.

ces influences extérieures demande le plus souvent de faire appel à des lois de différentes théories et donc de ne pas se conformer à la caractéristique des modèles de loi couvrante qui est de ne faire appel qu'à des lois provenant des mêmes théories.

1.4.3 Hypothèses auxiliaires et conditions aux limites en mécanique céleste : le cas du mouvement d'une planète dans un champ gravitationnel newtonien

On pourrait soutenir que les modèles de loi couvrante ne décrivent qu'une forme très idéalisée de prédictions, celles qui ont lieu dans les cas ne demandant ni hypothèses aux limites ni hypothèses auxiliaires, par exemple lorsque l'on a affaire à des systèmes isolés comme le système solaire⁷⁸. Pourtant, Hempel lui-même fait remarquer que des conditions aux limites sont nécessaires pour réaliser des prédictions en astronomie planétaire.

En effet, même dans les rares cas où l'on ne considère que deux corps en interaction gravitationnelle, c'est-à-dire lorsque l'on a affaire à un système isolé dont les équations peuvent être résolues analytiquement, de telles hypothèses auxiliaires et conditions aux limites interviennent de manière déterminante si l'on cherche à prédire le comportement du système.

Le logicien Neil Tennant a proposé une démonstration des lois de Kepler à partir des lois de la gravitation newtonienne « avec suffisamment de détails logique pour rendre plausible que, le raisonnement présenté ici pourrait être complètement formalisé, si la place ne manquait pas, pour l'exposer à la manière rigoureuse de la déduction naturelle « à la Gentzen »⁷⁹. Il s'agit donc d'étudier la prédiction du mouvement d'une planète dans le champ gravitationnel newtonien du soleil : c'est un problème à deux corps isolés que l'on peut résoudre analytiquement.

⁷⁸C'est notamment la thèse de Norwood HANSON, "On the Symmetry Between Explanation and Prediction", *The Philosophical Review* 68.3 (1959), p. 349–360.

⁷⁹Neil TENNANT, "The logical structure of scientific explanation and prediction : planetary orbits in a Sun's gravitational field", *Studia Logica* 95.1 (2010), p. 207–232, p. 207.

L'intérêt de la démarche de N. Tennant est d'isoler clairement la structure logique de cette prédiction ainsi que la nature des hypothèses qui y interviennent. Et parmi celles-ci s'en trouvent deux qui sont des conditions aux limites sans preuve, voire en contradiction avec d'autres éléments de la théorie de Newton.

La première de ces hypothèses est identifiée comme une condition aux limites par N. Tennant⁸⁰ : c'est celle qui pose que l'énergie totale de la planète (la somme de son énergie cinétique et potentielle) est strictement inférieure à zéro. Cette condition aux limites est nécessaire pour démontrer que l'orbite décrite par un objet soumis à une force centrale est une ellipse et non une hyperbole ou une parabole.

La seconde de ces hypothèses à entrer dans la prédiction de l'orbite des planètes est que « l'on peut traiter le soleil comme fixé plutôt que comme orbitant autour du centre de masse commun de deux corps »⁸¹. Cette supposition revient à nier que la planète attire aussi le soleil (et donc le caractère universelle de l'interaction gravitationnelle) et la troisième loi de Newton (toute force exercée sur un corps A par un corps B est accompagnée d'une force de même direction et intensité mais de sens opposé).

Comme l'avait déjà remarqué Duhem, dans le chapitre 6 de la deuxième partie de *La Théorie physique*, si l'on ne fait pas cette hypothèse on ne peut dériver les lois de Kepler. Autrement dit, « si la théorie de Newton est exacte, les lois de Kepler sont nécessairement fausses »⁸². Cela tient au fait que, dans les lois de Kepler, le corps central est pris comme « terme de comparaison immobile », tandis que le principe de la gravitation universelle et les lois de la dynamique de Newton impliquent que la planète agit aussi sur le corps central, ce qui a pour effet de les faire orbiter autour d'un centre de gravité commun⁸³. C'est cet argument

⁸⁰TENNANT, "The logical structure of scientific explanation and prediction : planetary orbits in a Sun's gravitational field", p. 225.

⁸¹TENNANT, "The logical structure of scientific explanation and prediction : planetary orbits in a Sun's gravitational field", p. 208.

⁸²DUHEM, *La Théorie physique*, p. 293.

⁸³Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'attraction d'une planète envers son étoile est loin d'être un effet négligeable et impossible à observer : les premières exoplanètes ont pu être détectées en observant la rotation de certaines étoiles autour d'un centre de gravité dû à l'attraction par une planète invisible.

qui permet à Duhem de rejeter la *méthode newtonienne*, c'est-à-dire l'induction des lois de la gravitation à partir des lois de Kepler. Autrement dit, l'hypothèse selon laquelle le centre du soleil est un point fixe est en contradiction avec les lois de la dynamique newtonienne, qui sont pourtant bien utilisées dans la prédiction de l'orbite d'une planète à partir de la théorie de Newton.

Ainsi, même une telle prédiction, qui est pourtant le cas le plus paradigmatique d'un système isolé descriptible à l'aide d'équations à solutions exactes, n'est pas exempte d'hypothèses simplificatrices, idéalisées ou fausses. Celles-ci jouent donc un rôle crucial⁸⁴ dans les raisonnements prédictifs qui utilisent des lois couvrantes et les modèles de loi couvrante doivent être modifiés pour les prendre en compte.

1.4.4 Le modèle carnapien des prédictions guidées par des lois

Ainsi, si l'on veut représenter la structure logique des prédictions *guidées par des lois* il faut amender les modèles de loi couvrante.

Par l'expression *guidé par des lois* on entend deux choses :

1. Les lois sont l'*élément moteur* de ces prédictions, en ce qu'elles sont indispensables pour réaliser l'inférence prédictive.

Cela se marque de deux manières. D'une part on peut n'utiliser que des lois pour réaliser la prédiction d'une nouvelle loi. D'autre part, dans le cas où l'on réalise la prédiction de l'occurrence d'un phénomène concret, ce sont les lois qui déterminent quelles données doivent être collectées et lesquelles ne sont pas pertinentes.

2. Étant l'élément moteur de ces prédictions, les lois sont aussi l'*élément testé* par ces prédictions.

Ce sont les pratiques scientifiques qui déterminent si une prédiction est bien guidée par une ou plusieurs lois et cela consiste, en dernière instance, à tester les lois par des prédictions de ce type. Si les

⁸⁴On revient sur la question de savoir si ce rôle est indispensable dans le chapitre 8, section 8.2.4.

lois n'apparaissent dans une prédiction qu'au titre d'outil et non comme élément fondamental, elles ne peuvent être testées par cette prédiction. Réciproquement si une prédiction est considérée, par une communauté scientifique, comme un test pour confirmer ou réfuter une loi, c'est que celle-ci y joue un rôle fondamental.

Lorsque l'on parle, dans le chapitre suivant, de prédictions guidées par des modèles ou des données, il faut donc entendre par là que ce sont des types de raisonnements prédictifs dans lesquels les modèles ou les bases de données jouent un rôle moteur et peuvent être mis en échec ou confirmés.

Pour modifier les modèles de loi couvrante afin qu'ils puissent être considérés comme de bons modèles des prédictions guidées par des lois et ainsi formaliser la conception classique des prédictions scientifiques, on peut utiliser la conception que se faisait Carnap des prédictions scientifiques. Malheureusement, celui-ci n'a pas exposé sa conception dans un seul et unique texte : il faut la reconstituer en rassemblant diverses références. C'est pour cela que l'on a souvent identifié la position de Hempel et de Carnap sur les explications et les prédictions et ce ne sont que de récents travaux sur les écrits de Carnap qui ont montré l'originalité de ses positions, de ses influences et de ses méthodes⁸⁵.

On a vu que dans les *Logical Foundations of Physics* Carnap considèrerait que l'on pouvait se passer de lois pour réaliser des prédictions. Même s'il ne revient pas sur cette thèse dans les *Philosophical Foundations of Physics*, il ne considère dans cet ouvrage que les prédictions qui sont des dérivations à partir de lois. Il se peut que Carnap ait complètement abandonné la thèse de prédictions sans lois face aux difficultés pour développer une théorie de la confirmation. Il se peut aussi que, pour Carnap, il soit possible de parler de deux types de prédictions : celles qui nécessitent des lois et celles qui n'en nécessitent pas. Comme on le voit dans le chapitre suivant, j'adopte une telle position pluraliste.

Toujours est-il que si l'on rassemble les remarques de Carnap dans les *Philosophical Foundations of Physics*, sa conception des prédictions

⁸⁵Pierre WAGNER, *Carnap's Ideal of Explication and Naturalism*, Houndmills, Palgrave Macmillan, 2016.

semble avoir les caractéristiques suivantes :

- Les prédictions ne portent pas que sur le futur : elles peuvent porter sur le passé ou le présent, tant que l'événement (ou la loi) prédit n'était pas connu au moment de la prédiction.
- Les prédictions jouent un rôle dans la confirmation des théories scientifiques.
- On peut prédire des occurrences particulières de phénomène ou de nouvelles lois à partir d'autres lois.
- Certaines hypothèses auxiliaires apparaissent dans les prédictions, notamment sous la forme de règles de correspondances qui permettent de traduire les énoncés du langage théorique en énoncés du langage d'observation.

Ces caractéristiques permettent de formaliser la conception classique des prédictions, en évitant les incohérences des modèles hempeliens et en étant plus conforme à l'emploi que les scientifiques et les philosophes des sciences font du terme de prédiction. Elles permettent aussi de caractériser les prédictions guidées par des lois par un certain nombre de propriétés, afin de pouvoir, dans les chapitres suivants, les comparer à d'autres types de raisonnements prédictifs :

1. Elles ont pour élément moteur des *lois scientifiques* qu'elles permettent de tester et qui peuvent s'inscrire dans des théories organisant ces lois les unes par rapport aux autres, notamment sous une forme axiomatique et hiérarchique.
2. Reposant sur des lois, ces prédictions peuvent être des *extrapolations* et non uniquement des *interpolations*.
3. Elles peuvent ne faire appel aux définitions, concepts et hypothèses d'une *unique théorie et/ou discipline*.
4. Elles nécessitent, lorsqu'elles ont pour objet des cas concrets, l'emploi de *conditions aux limites* et d'*hypothèses auxiliaires*, qui ne sont

pas forcément confirmées ni considérées vraies (notamment lorsque ce sont des idéalizations ou des simplifications utilisées pour appliquer et résoudre la formulation mathématique de ces lois).

1.5 Conclusion du chapitre

La conclusion de ce chapitre est qu'il n'existe pas une seule et unique forme de prédiction, la conception classique de prédictions guidées par des lois et que cette conception classique n'est pas représentée de manière cohérente par les modèles de loi couvrante de Hempel. Nous avons vu qu'il existe des exemples de prédictions qui s'éloignent de ces modèles sur chacune de leur caractéristiques. Autrement dit, il peut exister des raisonnements prédictifs qui diffèrent sur une ou plusieurs des caractéristiques suivantes des modèles de loi couvrante :

- Ce raisonnement a pour conclusion un énoncé qui concerne l'avenir.
- Ce raisonnement comporte nécessairement une loi dans ses prémisses.
- Ce raisonnement ne comporte que des énoncés d'une même théorie dans ses prémisses.
- Ce raisonnement a pour conclusion un énoncé qui décrit l'occurrence particulière d'un phénomène.

Il est donc tout à fait possible qu'un raisonnement prédictif ne porte pas sur un énoncé concernant le futur, ni qu'il emploie aucune loi, ni qu'il n'utilise qu'une seule théorie, ni qu'il ait pour conclusion l'occurrence particulière d'un phénomène. On examine dans le chapitre suivant des prédictions de ce type et je montre que certaines controverses pourraient être clarifiées, voire évitées, si l'on accepte qu'il existe des formes de raisonnements prédictifs différentes et cohérentes.

Cependant, les modèles de loi couvrante, tels qu'ils sont définis par Hempel, ne représentent pas une forme de raisonnement prédictif cohérente. Ils rencontrent en effet de sérieuses objections. Si l'on adopte la

version carnapienne des prédictions de loi couvrante on peut éviter ces objections et mieux rendre compte des emplois que font les scientifiques et les philosophes du terme de prédiction.

Ainsi, au terme de notre analyse conceptuelle de la notion de prédiction, nous n'avons pas obtenu une seule et unique structure logique des raisonnements prédictifs, mais nous avons ouvert la possibilité qu'il puisse en exister plusieurs. Dans le chapitre suivant, il s'agit de voir lesquels de ces raisonnements sont réellement employés dans les pratiques scientifiques et comment ces différents types de prédictions diffèrent et s'articulent.

Chapitre 2

Prédictions guidées par des données et par des modèles dans les « sciences naturelles historiques »

Dans le chapitre précédent, on a vu que l'on pouvait réaliser des prédictions en se passant de lois. Dans ce chapitre, on formalise ces prédictions sans lois en deux catégories : les prédictions guidées par des modèles et les prédictions guidées par des données. Ces formes de prédictions apparaissent si l'on étudie les prédictions en biologie évolutive et en géomorphologie. Je montre que la structure logique de ces prédictions ne se conforment pas à la conception classique et jouent un rôle crucial dans ces sciences où la capacité à réaliser des expériences scientifiques est limitée. Même si je ne considère pas que l'on puisse tracer une ligne claire et définie entre ces disciplines et les sciences expérimentales (voir chapitre 9, section 9.2.3), je désigne ce groupe de disciplines par l'appellation de « sciences naturelles historiques »¹.

Pour catégoriser différents types de raisonnements prédictifs, on ne peut pas se limiter à l'analyse conceptuelle comme dans le chapitre précé-

¹Cette dénomination est empruntée à Carol CLELAND, "Prediction and Explanation in Historical Natural Science", *British Journal for the Philosophy of Science* 62.3 (2011), p. 551–582.

dent : il est nécessaire d'étudier directement les recherches scientifiques à but prédictif telles qu'elles sont réellement menées. C'est pourquoi j'examine dans ce chapitre non seulement des cas concrets de prédictions en théorie de l'évolution et en géomorphologie, mais aussi des controverses sur le pouvoir prédictif de certaines théories, controverses où interviennent des scientifiques qui sont amenés à clarifier ce leurs pratiques prédictives.

Je commence (section 1) par retracer les étapes du débat — impliquant épistémologues et scientifiques — sur le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution, qui est réapparu récemment dans le domaine de la géologie.

Même si je soutiens qu'il existe d'authentiques prédictions dans ces disciplines, je critique, dans la section suivante, la manière dont on a jusqu'à présent soutenu cette thèse, c'est-à-dire en reformulant les théories que l'on trouve dans ces disciplines sous une forme axiomatique et hiérarchisée pour montrer qu'elles sont capables de réaliser des prédictions conformes à la conception classique des prédictions scientifiques guidées par des lois. Je montre au contraire par deux études de cas que le modèle de prédiction développé à la fin du chapitre 1 n'est pas adapté pour décrire ces raisonnements prédictifs, qui ont des structures différentes (section 2) : les lois scientifiques n'y jouent pas un rôle moteur, ce sont des prédictions guidées soit par l'usage de *modèles*, soit par l'utilisation statistiques de *bases de données*.

Dans un dernier temps (section 3), je montre que l'importance de ces formes de raisonnement prédictif va croissant — et ne peut plus être mise de côté par la philosophie des sciences — depuis l'apparition des bases de données massives (*Big Data*) et la multiplication moyens de traitement d'immenses volumes de données, qui impose des pratiques prédictives et des enjeux épistémologiques spécifiques.

2.1 Les controverses sur le pouvoir des sciences naturelles historiques

Une des particularités des controverses le pouvoir prédictif de certains domaines des sciences naturelles historiques est qu'il est difficile de séparer leurs dimensions scientifique et philosophique : les acteurs sont parfois des philosophes des sciences intéressés par les problèmes de modèles d'explication (comme Scriven) et parfois des scientifiques qui étudient des problèmes méthodologiques comme Ernst Mayr (1904-2005). Même si ces controverses ont une « couleur » philosophique parce qu'elles impliquent de prendre position sur des questions traditionnelles d'épistémologie, comme le statut des théories scientifiques et de leur confirmation, les articles qui alimentent ces controverses paraissent aussi bien dans des revues philosophiques comme le *British Journal for Philosophy of Science* que dans des revues scientifiques comme *Science*, certains auteurs publiant même dans ces deux domaines. Ainsi, il est légitime de parler de controverses à la fois scientifiques et épistémologiques pour désigner les débats concernant le pouvoir prédictif de certaines théories.

Dans un premier temps, j'expose la controverse qui, depuis la fin des années 1950, porte sur le pouvoir prédictif de la biologie évolutive. Dans un second temps, je montre que depuis le début du XXI^e siècle un débat similaire a émergé en géologie sur le pouvoir prédictif des hypothèses et des modèles dans cette discipline.

2.1.1 Le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution

La question de la présence de prédictions en biologie ne se pose pas de la même manière selon la discipline biologique considérée. Le fait que l'on puisse réaliser des prédictions classiques en génétique est suffisamment consensuel pour qu'il n'y ait pas de controverse sur la pouvoir prédictif de cette discipline. En effet, depuis la théorie de l'hérédité de Mendel au moins, on dispose de lois statistiques s'appliquant à des systèmes vivants manipulables en laboratoire. La première loi de Mendel, par exemple, énonce si l'on hybride une souche pure présentant un caractère dominant

et une souche pure présentant un caractère récessif, les trois quart en moyenne de leur descendance présenteront le caractère dominant (sous réserve qu'aucun pollen extérieur ou pression environnementale ne vienne perturber l'hybridation et la croissance de ces descendants). On peut tester cette prédiction en laboratoire dès lors que l'on dispose des outils suffisants pour contrôler le croisement entre les deux souches, comme par exemple la fécondation artificielle des plantes à fleur. De plus, il est possible, de la même manière, de dériver de cette loi des prédictions concernant les générations suivantes selon l'hybridation à laquelle on les soumet. Les prédictions en génétique se conforment parfaitement au modèle des prédictions guidées par des lois.

En revanche, de telles lois statistiques précisément chiffrées et la possibilité de manipulations expérimentales visant à les appliquer, semblent indisponibles dans d'autres domaines de la biologie et notamment les disciplines chargées d'étudier l'évolution des espèces.

En effet, il n'y a pas de consensus parmi les biologistes et les philosophes de la biologie sur le fait que la théorie de la sélection naturelle repose sur des lois ayant le même statut que les lois physiques. De plus, selon cette théorie, l'évolution d'une espèce résulte des mutations des individus de cette espèce et des changements de leur milieu (c'est-à-dire à la fois les transformations géographiques et climatiques, mais aussi et surtout l'évolution des autres espèces qui partagent la même niche écologique que l'espèce en question). L'évolution d'une espèce dépend donc de très nombreuses variables, si bien qu'il semble impossible de d'étudier leurs corrélations exhaustivement, ou de les manipuler en laboratoire afin de les tester séparément. Sans pouvoir étudier ces corrélations une par une, il peut sembler au premier abord impossible de fixer la valeur d'une de ces variables à partir d'informations sur les autres et donc de réaliser aucune prédiction. Ne pouvant par exemple déterminer comment le milieu d'une espèce va se transformer, ni comment les individus qui la composent vont muter, il ne semble pas possible de prédire comment cette espèce va évoluer. En revanche, il semble possible de déterminer *a posteriori* — c'est-à-dire une fois qu'une espèce a connu un événement évolutif — quels facteurs ont joué un rôle déterminant dans cet évé-

ment, afin d'expliquer le cours qu'a pris l'évolution.

Cette asymétrie apparente entre capacité explicative et capacité prédictive de la théorie de l'évolution a été repérée et utilisée par Scriven, dans un article de 1959 publié dans *Science* et intitulé « Explanation and Prediction in Evolutionary Theory », contre la thèse de l'identité structurale de Hempel, qui affirme que les raisonnements prédictifs et explicatifs ont la même structure logique (voir section 1.1.1 du chapitre précédent) et donc que toute science explicative devrait aussi être prédictive.

L'argument de Scriven est que la théorie de la sélection naturelle repose sur le concept d'« adaptation » (*fitness*) qui définit une certaine relation entre un organisme et son environnement. Cela implique que l'« on ne peut prédire quels organismes survivront sinon dans la mesure où l'on peut prédire les changements environnementaux. Or nous sommes très peu équipés pour cela »². Ainsi, tout ce que l'on peut réaliser, ce sont des « prédictions hypothétiques » de la forme « si cette région devient inondable, alors les animaux sachant nager seront plus adaptés »³. Mais de telles prédictions n'ont de prédictif que le nom pour Scriven, car il est impossible de prédire ou de produire expérimentalement l'hypothèse qui constitue la prémisse de la prédiction (« si cette région devient inondable »). De plus, même si l'on parvenait à prédire les transformations de l'environnement, on rencontrerait le même problème pour prédire les mutations des individus d'une espèce face à ces changements de pression sélective : face à un changement de la pression sélective, on ne peut pas prédire *a priori* quelles mutations génétiques vont se produire, ni lesquelles vont être avantageuses.

L'argument de Scriven est donc le suivant : les organismes et leur environnement sont des systèmes affectés par un grand nombre de facteurs d'origine diverses que l'on ne peut reproduire ou contrôler expérimentalement. C'est ce que l'on appelle des *systèmes ouverts*, par opposition aux systèmes manipulés en laboratoire qui sont dits clos ou fermés car on peut éviter qu'ils soient perturbés. Ainsi, aucun des facteurs qui affectent les organismes et leur environnement n'a une probabilité beaucoup plus forte

²SCRIVEN, «Explanation and Prediction in Evolutionary Theory», p. 130.

³SCRIVEN, «Explanation and Prediction in Evolutionary Theory», p. 130.

que les autres de produire ses effets : un changement de la température terrestre moyenne peut par exemple être produit par de très nombreux facteurs comme la variation de la luminosité solaire, de l'excentricité de l'orbite terrestre, du taux de CO₂ dans l'atmosphère, etc., mais aucun de ces facteurs n'a un rôle décisif qui permettrait à lui seul d'inférer comment va évoluer la température. On a donc affaire à une combinaison de causes rendant l'évolution des systèmes ouverts aléatoires, empêchant ces systèmes d'être prévisibles. Cependant, pour Scriven, même si un événement n'a qu'une faible probabilité d'en entraîner un autre, il peut toujours compter comme l'explication de celui-ci. Voilà pourquoi, selon lui, nous sommes capables d'expliquer l'évolution des espèces *a posteriori*, mais non de la prédire.

Deux ans après Scriven, Mayr, l'un des principaux artisans de la synthèse moderne (la synthèse entre théorie darwinienne de l'évolution et théorie mendélienne de l'hérédité, qui donna une place centrale à l'évolution dans toutes les branches de la biologie⁴) publie un article dans *Science*, qui propose une distinction entre différents types de recherches sur le vivant qui eut une importante postérité à la fois en biologie et en philosophie de la biologie. Les deux formes de biologie sont la biologie *fonctionnelle* et la biologie *évolutive*. Si la première emploie la méthode expérimentale, la biologie évolutive cherche à « étudier les étapes qu'ont traversées les miraculeuses adaptations si caractéristiques de chaque aspect du monde organique. »⁵ : c'est donc une discipline dont l'objectif est de reconstituer une *histoire*. Pour cette forme de biologie, Mayr admet l'argument de Scriven :

La théorie de la sélection naturelle peut décrire et expliquer certains phénomènes avec une précision considérable, mais elle ne peut faire de prédictions fiables, si ce n'est sous la forme d'énoncés triviaux et sans significations, tel que, par exemple : « les individus les plus adaptés laisseront, en

⁴Voir Patrick DAVID et Sarah SAMADI, *La Théorie de l'évolution : Une logique pour la biologie*, Paris, Flammarion, 2011, p. 299.

⁵Ernst MAYR, "Cause and effect in biology : Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist", *Science* 134.3489 (1961), p. 1501–1506, p. 1502.

moyenne, plus de descendants. » Scriven a insisté avec raison sur le fait que la plus importante contribution à la philosophie faite par la théorie de l'évolution a été de démontrer l'indépendance de l'explication et de la prédiction⁶.

Remarquons que si Mayr, comme Scriven, définit les prédictions comme des *prévisions*, c'est-à-dire des énoncés qui portent sur une date postérieure à la date où est réalisé le raisonnement prédictif⁷, Mayr semble, par moments, considérer que ce ne soit pas la seule forme de prédiction possible en science :

En réalité, la manière dont on peut définir « prédiction » en biologie est discutable. Un zoogéographe peut prédire, avec une grande précision, quels animaux peuvent être trouvés sur une montagne ou une île encore non explorée. Un paléontologiste peut, de la même manière, prédire avec une forte probabilité à quel type de fossiles s'attendre dans un horizon géologique nouvellement accessible. Est-ce que de telles conjectures correctes d'événements passés sont des prédictions? [...] Le terme *prédiction*, cependant, est utilisée de manière sûre et légitime pour les événements futurs⁸.

Cette apparente digression de Mayr n'est pas sans importance puisqu'elle a été utilisée par les défenseurs du pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution pour répondre aux arguments de Scriven et Mayr.

La mathématicienne et biologiste Mary Williams a ainsi cherché à fournir plusieurs exemples de prédictions de la théorie de l'évolution du genre suggéré par Mayr dans les différents articles qu'elle a écrits sur la question de la testabilité de la théorie de la sélection naturelle⁹.

⁶MAYR, "Cause and effect in biology : Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist", p. 1502.

⁷Voir, sur ce point, la section 1.3.1.

⁸MAYR, "Cause and effect in biology : Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist", p. 1504.

⁹M. Williams n'est pas la seule à avoir critiqué la position de Scriven et Mayr, mais c'est elle qui a proposé les arguments les plus développés et les plus cohérents à ma connaissance. Pour des raisons de clarté et de brièveté, je n'ai exposé ici que les

Après avoir proposé une axiomatisation de cette théorie en 1970¹⁰ dans un journal de biologie théorique, elle a soutenu, dans plusieurs articles de philosophie des sciences¹¹, les trois thèses suivantes :

- (1) La structure de la théorie de l'évolution par sélection naturelle n'est pas différente de celle des théories physiques comme la théorie cinétique des gaz.
- (2) Il existe des prédictions falsifiables tirées de la théorie de l'évolution ;
- (3) Ces prédictions et leur test ont la même importance en biologie de l'évolution que dans la plupart des domaines de recherche de la physique.

Dans l'axiomatisation de M. Williams, « l'unité fondamentale d'évolution est le clan ; c'est le clan qui est perpétué de manière différentielle (que ce soit un clan de gène, d'organismes, ou de populations), et c'est cette perpétuation différentielle qui change la face de la nature »¹². Le terme primitif fondamental de cette axiomatisation étant un groupe d'entités, les conséquences déduites des axiomes, parmi lesquelles on trouve des prédictions observables, concernent ces mêmes *groupes*. Ces prédictions sont donc pour M. Williams à comparer avec celles que l'on réalise en physique statistique, par exemple en tirant des prédictions de la théorie cinétique des gaz sur des populations de molécules.

Ainsi, l'apparent hasard des phénomènes biologiques n'est pas plus un obstacle au pouvoir prédictif de la théorie de la sélection naturelle que

principaux arguments et contre-arguments de la controverse sur le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution, mais on peut se rapporter à l'annexe du chapitre 2 pour un historique plus détaillé de ce débat.

¹⁰Mary WILLIAMS, "Deducing The Consequences Of Evolution : A Mathematical Model", *Journal of Theoretical Biology* 29.3 (1970), p. 343–385.

¹¹Voir notamment : Mary WILLIAMS, "Falsifiable Predictions of Evolutionary Theory", *Philosophy of Science* 40.4 (1973), p. 518–537, Mary WILLIAMS, "The Logical Status Of The Theory Of Natural Selection And Other Evolutionary Controversies", *The Methodological Unity of Science* (1973), p. 343–385, Mary WILLIAMS, "The Importance of Prediction Testing in Evolutionary Biology", *Erkenntnis* 17.3 (1982), p. 291–306

¹²WILLIAMS, "Deducing The Consequences Of Evolution", p. 350.

l'apparent hasard du mouvement des particules des gaz n'est un obstacle au pouvoir prédictif de la théorie cinétique des gaz. L'indétermination due au hasard n'apparaît que lorsqu'on essaye de déterminer quel individu particulier, dans les « clans » considérés, ont ou n'ont pas la propriété qui fait l'objet de la prédiction.

Le schéma suivant et son explication se trouvent dans son article de 1973 :

Théorie des gaz	$\vec{1}$	Prédictions sur la température, pression, etc.	$\vec{2}$	Prédiction probabiliste sur la vitesse des atomes, etc.
Théorie de la sélection naturelle	$\vec{1}$	Prédictions sur les rapports, la survie des clans, etc.	$\vec{2}$	Prédiction probabiliste sur la descendance d'un couple, la survie d'un individu, etc.

Les flèches labellisée 1 indiquent des dérivations hypothéticodéductives des prédictions depuis la théorie. Les flèches labellisée 2 indiquent les dérivations probabilistes de prédictions probabilistes, à partir des prédictions réelles¹³.

Pour M. Williams, la prédiction « réelle » (*actual*) est inférée dans un cadre hypothéticodéductif, et les probabilités n'apparaissent que lorsque l'on sort de ce cadre pour appliquer ce résultat à des individus particuliers. Si nous étions plus intéressés par les groupes d'organismes que par les individus, nous n'aurions jamais perçu aucun aléatoire dans l'évolution des espèce nous empêchant de dériver des prédictions. Mais étant plus intéressés par les objets de taille humaine, les organismes, que par des populations d'organismes, nous avons l'impression que les prédictions réelles sont celles qui concernent les individus. C'est donc uniquement le fait contingent que la théorie de l'évolution n'a pas pour objet des entités de taille humaine qui lui donne sa particularité et son aspect aléatoire : « la particularité logique [de ces prédictions] n'est pas une propriété de

¹³WILLIAMS, "The Logical Status Of The Theory Of Natural Selection And Other Evolutionary Controversies", p. 529.

la théorie de l'évolution, c'est une propriété de la perspective à taille humaine sur la théorie de l'évolution »¹⁴.

Comme on le voit, l'argumentation de M. Williams ne questionne pas la conception classique des prédictions et consiste à montrer que l'on peut formuler des raisonnements prédictifs conformes à cette conception dans le cadre de la théorie de l'évolution¹⁵. Je considère que cette argumentation réussit bien à atteindre cet objectif. On ne discutera donc pas la thèse (2) de M. Williams. On ne discutera pas non plus la thèse (1), car la question du statut des théories biologiques est si complexe qu'elle demanderait une thèse à part. Cependant, je montre dans la deuxième section de ce chapitre que la thèse (3) accorde trop d'importance à ces prédictions conformes à la conception classique des prédictions guidées par des lois : en biologie elles ne sont ni les seules formes de prédictions, ni les plus fréquentes. En cherchant des prédictions qui permettraient d'exhiber un contre-exemple frappant aux thèses de Scriven, Mayr, Smart et Popper, M. Williams a laissé de côté la majeure partie de l'activité prédictive de la biologie évolutive, activité qui n'emploie pas de lois et qui ne se fait pas en contexte expérimental.

Ainsi, les exemples que prend M. Williams en 1973 de prédictions réfutables de la théorie de l'évolution¹⁶, ne sont des exemples « de terrain » qui ne peuvent pas être directement déduites de l'axiomatisation de la théorie de l'évolution qu'elle avait exposée en 1970 :

- La plupart des espèces soumises à la sélection naturelle doivent avoir connu une spéciation allopatrique, c'est-à-dire une évolution due à un isolement géographique.
- La proportion d'hétérozygotes, pour un trait donné dans une population, doit être différente du nombre d'hétérozygotes dus à la

¹⁴WILLIAMS, "The Logical Status Of The Theory Of Natural Selection And Other Evolutionary Controversies", p. 536.

¹⁵Cette stratégie argumentative s'explique par le contexte philosophique dans lequel M. Williams écrit : durant les années 1960-1970, la théorie de l'évolution a fait l'objet de différentes critiques épistémologiques visant sa testabilité, notamment celles des philosophes des sciences John Smart (1920-2012) et Karl Popper, qui accordaient à la biologie un degré de scientificité inférieure à la physique et à la chimie. Se reporter à l'annexe du chapitre 2 pour plus de détails sur ce contexte.

¹⁶WILLIAMS, "Falsifiable Predictions of Evolutionary Theory".

mutation et à l'immigration.

Ces prédictions ne peuvent être déduites d'une théorie de l'évolution axiomatisées parce qu'elles supposent d'autres disciplines pour pouvoir être dérivées : la géomorphologie d'une part, la génétique mendélienne de l'autre. Il est en effet très difficile de trouver des prédictions de la théorie de la sélection naturelle qui correspondent à la conception classique des prédictions guidées par des lois, c'est-à-dire qui découleraient directement, comme des théorèmes mathématiques, d'un seul groupe d'énoncés pris comme axiomes, sans utiliser d'autres théories. La raison en est, comme je le montre dans la deuxième section de chapitre, que les raisonnements prédictifs les plus fréquents en biologie évolutive n'ont pas la structure des prédictions guidées par des lois.

2.1.2 Le pouvoir prédictif de la géologie

Le débat sur le pouvoir prédictif de la théorie de la sélection naturelle ne repose pas sur des particularités spécifiques à ses objets. D'autres scientifiques que les biologistes sont confrontés à des systèmes ouverts affectés par de très nombreux facteurs de nature et d'importance différentes, tout en étant très sensibles aux conditions initiales et aux conditions aux limites. Il n'est donc pas étonnant de rencontrer des débats similaires dans d'autres disciplines ni que certains philosophes des sciences aient cherché à poser le problème dans toute sa généralité, c'est-à-dire comme un problème qui affecte tout un ensemble de disciplines en raison de leur objet et de leur méthode — ce que l'on appelle à la suite de C. Cleland les « sciences naturelles historiques ».

Depuis les années 1990¹⁷ certains géologues ont soulevé la question du pouvoir prédictif de leur discipline dans un contexte et des termes proches des biologistes des années 1960-1970. La place manque ici pour évoquer l'ensemble de ces controverses, d'autant qu'aucun travail de synthèse sur

¹⁷Cf. Peter WILCOCK et Richard IVERSON, "Prediction in geomorphology", *Prediction in geomorphology*, sous la dir. de Peter WILCOCK et Richard IVERSON, American Geophysical Union, 2003, p. 3–11. Dans la dernière section de ce chapitre, on montre que si le débat a émergé à cette époque, cela est dû à l'arrivée d'importantes bases de données et des capacités informatiques pour les traiter à peu de frais.

le sujet n'a été réalisé, mais celle qui a pris place en géomorphologie depuis le milieu des années 1990 aux États-Unis sous l'impulsion des chercheurs en sciences de la Terre de l'Université de Duke est particulièrement représentative.

La géomorphologie est la discipline qui, au sein de la géologie, étudie les reliefs à la surface de la Terre et leurs processus de formation, et qui intègre, à cette fin, aussi bien les lois de la mécanique classique, que des processus géologiques, ou des modèles climatologiques. La diversité de ces facteurs fait des systèmes étudiés par la géomorphologie des systèmes ouverts, impossibles à reproduire et à contrôler en totalité en laboratoire.

En 1996, le géologue Peter Haff de l'Université de Duke, relève ainsi sept sources d'incertitude qui affectent les systèmes géographiques et limitent fortement le pouvoir prédictif des modèles en géomorphologie : (i) l'imperfection des modèles, (ii) l'omission de processus importants, (iii) le manque de connaissance des conditions initiales, (iv) la sensibilité aux conditions initiales, (v) l'hétérogénéité entre différents facteurs, (vi) l'occurrence de forces externes, (vii) l'impossibilité d'appliquer un facteur de sécurité¹⁸.

Les sources (ii) à (vi) décrivent précisément ce que l'on a appelé des systèmes ouverts. Les sources (i) et (vii) illustrent deux des spécificités de la controverses sur le pouvoir prédictif de la géologie : d'un part les modèles sont considérés, comme on le montre plus loin, en géologie comme l'outil principal voire exclusif pour réaliser des prédictions, et d'autre part les prédictions géologiques ont un important rôle pratique d'assistance à l'action publique¹⁹.

En 1998, un débat éclot ainsi dans les pages de la revue *Shore and Beach*, spécialisée dans la géomorphologie des côtes, lorsque le géologue Paul Komar estime que la capacité de la géomorphologie à produire des modèles quantitatifs complexes et fidèles à la réalité est un signe de sa

¹⁸Peter HAFF, "Limitations on Prediction in Geomorphology", Colin THORN, *The Scientific Nature of Geomorphology*, Bruce Rhoads, 1996, chap. 14, p. 337.

¹⁹« Les prédictions sans modèles (définis largement) sont sans fondation ni moyen de correction. Il y a clairement, non seulement une demande, mais aussi une obligation pour les modèles géomorphologiques, de concentrer et d'appliquer rigoureusement nos meilleures connaissances pour répondre à des besoins sociétaux » WILCOCK et IVERSON, "Prediction in geomorphology", p. 4.

maturité et de son succès. Quelques semaines plus tard, sept géologues de l'Université de Duke, publient une réponse argumentant que l'apparition de modèles numériques ne représente pas un signe de maturité de leur discipline, pour des raisons proches de celles évoquées par P. Haff deux ans plus tôt.

Un nombre énorme de variables de processus sont à l'œuvre dans un système côtier non-linéaire. Ces variables interagissent les unes avec les autres, à des échelles spatiales différentes. Cette complexité impressionnante signifie que, à présent, nous n'en savons tout simplement pas assez à propos de ces interactions pour formuler des équations qui les décrivent. Le résultat est que les modèles côtiers numériques sont largement empiriques, et reposent sur des calibrations de coefficients, afin de masquer les incertitudes dans les équations de processus²⁰.

La référence aux systèmes non-linéaires et à la sensibilité aux conditions initiales vise explicitement à qualifier les systèmes géologiques comme des systèmes de chaos déterministes soumis à une hypersensibilité aux conditions initiales et donc imprédictibles.

Mêmes ceux qui soutiennent que la géomorphologie a un pouvoir prédictif, comme le géographe Michael Church de l'université de Colombie Britannique à Vancouver, admettent ces difficultés :

La géomorphologie est l'une des sciences les plus difficiles. La raison en est la complexité posée par les conditions aux limites (la surface de la Terre) et la nature contingente des conditions initiales (l'histoire de la Terre).

Ainsi, c'est parce que les systèmes étudiés en géomorphologie sont *ouverts* qu'ils sont *historiques*, c'est-à-dire non répétables, même en laboratoire²¹.

²⁰Laura LIBBEY et al., "Another view of the maturity of our science", *Shore and Beach* 66 (1998), p. 2-4, p. 2.

²¹L'extrapolation de résultats obtenus en laboratoire – par exemples dans des aquariums à vague où l'on reproduit à petite échelle les reliefs côtiers et les courants marins – à des systèmes « réels », c'est-à-dire en dehors du laboratoire — a aussi explici-

Voilà pourquoi, à côté de ce débat sur le pouvoir prédictif de la géologie, sont apparus en philosophie des sciences des considérations sur la méthode des sciences confrontés à ces systèmes naturels mais aussi historiques.

2.1.3 Les prédictions dans la méthodologie des sciences naturelles historiques

Ce débat est grande partie animé par la philosophe des sciences C. Cleland qui a développé une conception de la « structure prototypique » des sciences historiques²². Elle soutient que les prédictions n'ont pas de rôle à jouer dans cette méthode idéal-typique. En effet, pour C. Cleland, les recherches historiques procèdent en deux étapes²³ :

1. Prolifération d'hypothèses à propos d'un événement passé particulier.
2. Recherche d'une « preuve tangible » (*smoking gun*), c'est-à-dire une trace d'un événement causalement relié à l'une des hypothèses en compétition, et permettant de trier parmi elles.

Les exemples mobilisés par Cleland sont tous à la conjonction de la géologie et de la paléontologie, notamment l'exemple récurrent de l'identification de la crise KT, crise biologique datant de 65 millions d'années qui clôt le Crétacé et vit la disparition de nombreuses espèces, notamment les dinosaures. Plusieurs hypothèses concurrentes ont été, selon Cleland, envisagées par les paléontologues : volcanisme intense, sénescence évolutive, explosion d'une supernova proche, impact d'un météorite, ... Au

tement critiquée : « Même un large réservoir à vague est un système à une échelle très petite, idéalisée, représentation close d'un système ouvert. Les vagues ne sont pas aléatoires, et les expériences à réservoirs à vagues réduisent la morphologie du littoral, à une simple interaction entre des vagues et du sable, sans la présence de marées réelles, de tempêtes, de courants de fonds, de facteurs biologiques ni de vents » LIBBEY et al., "Another view of the maturity of our science", p. 3.

²²Il faut remarquer que C. Cleland admet que la méthode qu'elle décrit n'est la méthode réelle et exclusive d'aucune discipline, puisque toutes les sciences naturelles historiques utilisent aussi des résultats d'études expérimentales.

²³Carol CLELAND, "Historical science, experimental science, and the scientific method", *Geology* 29.11 (2001), p. 987–990, p. 989.

début des années 1980, le physicien Luis Alvarez et son fils géologue Walter Alvarez ont découvert d'importantes quantités d'iridium et de quartz marqués de stries parallèles dans la strate géologique correspondant à la crise KT. Or seule l'hypothèse de l'impact de météorite permet d'expliquer ces traces : elles ont donc fait office de preuve tangible et éliminèrent les hypothèses rivales.

Pour C. Cleland, ce mode de raisonnement n'implique aucune prédiction ou rétrodition, car une prédiction est, selon elle, le résultat d'une inférence dont la conclusion est presque certaine (soit une déduction, soit une induction avec un haut degré de probabilité). Or, dans les sciences naturelles historiques, on considère des situations impliquant de très nombreuses circonstances, qui ne permettent pas de réaliser ce type d'inférence :

L'état actuel des sciences de la Terre et de la planétologie nous informe qu'il y a juste trop de circonstances fortement probables capables de défaire une inférence allant d'une présence anormale d'iridium à un gigantesque impact de météorite²⁴.

Même si elle accepte l'existence de rétrodictions, C. Cleland définit explicitement les prédictions comme le fait Hempel, en renvoyant aux modèles de loi couvrante sous le nom de « modèle traditionnel d'explication et de prédiction scientifique »²⁵. C'est donc parce qu'elles conçoit les prédictions comme étant essentiellement guidées par des lois que C. Cleland considère qu'elles sont absentes des sciences naturelles historiques, puisque « les explications dans les sciences historiques invoques rarement même des généralisations. La longue chaîne de causes s'étirant entre un événement préhistorique et ses traces contemporaines est juste trop complexes pour être capturé dans une généralisation plausible du genre requis par le modèle de lois couvrantes »²⁶.

C. Cleland admet bien que certaines lois puissent intervenir dans les sciences historiques, mais elles proviennent de disciplines expérimentales comme la physique ou la génétique, et le but des recherches en géologie

²⁴CLELAND, "Prediction and Explanation in Historical Natural Science", p. 558.

²⁵CLELAND, "Prediction and Explanation in Historical Natural Science", p. 563.

²⁶CLELAND, "Prediction and Explanation in Historical Natural Science", p. 564.

ou en paléontologie n'est ni de les tester ni de les corriger. Ce ne sont que des outils au service d'autres fins, comme expliquer un événement particulier de l'histoire de la Terre ou de l'évolution des espèces.

C'est l'inférence à la meilleure explication, qui prennent la place laissée vacantes par les prédictions dans les sciences naturelles historiques. Pour C. Cleland, cette meilleure explication est celle qui identifie la cause commune de traces géologiques et/ou paléontologiques, et sa recherche est possible et souhaitable en vertu du principe de « sur-détermination des causes par les effets »²⁷. Selon ce principe, un effet sur-détermine ses causes passées, parce qu'une cause a souvent de très nombreux effets. À l'inverse, une cause sous-détermine ses effets futurs, parce que c'est souvent une conjonction de causes qui est à l'origine d'un effet.

Ce principe implique que si l'on n'est pas dans un contexte de contrôle expérimental où il est possible de manipuler et de sélectionner les facteurs causaux à l'œuvre dans un système donné, il est alors quasiment impossible, à partir d'un événement localisé de chercher à prédire quels seront ses effets, tandis qu'il est possible de conjecturer plusieurs causes qui auraient pu lui donner naissance, et ensuite de se mettre à rechercher d'autres effets afin de trier parmi ces hypothèses.

La plupart des interventions dans cette controverse sur le pouvoir prédictif des sciences naturelles historiques — à une exception près, que l'on détaille dans la section suivante — se sont concentrées sur l'utilisation que C. Cleland fait du principe de sur-détermination. Ainsi, David Turner²⁸, Peter Inkpen et Richard Wilson²⁹ ont soutenu, l'un dans une revue de philosophie des sciences, les deux autres dans une revue scientifique, que cette sur-détermination n'était qu'un principe métaphysique et non méthodologique. En effet, lorsqu'on effectue des recherches sur le terrain, les traces d'une preuve tangible ont beau avoir été nombreuses, elles sont effacées par certains processus comme l'érosion ou la subduc-

²⁷Ce principe est, pour Lewis, une conséquence de la surdétermination des énoncés contrefactuels. Voir David LEWIS, "Counterfactual dependence and time's arrow", *Noûs* (1979), p. 455–476.

²⁸Derek TURNER, "Local Underdetermination in Historical Science", *Philosophy of Science* 72.1 (2005), p. 209–230.

²⁹Rob INKPEN et Graham WILSON, "Explaining the past : abductive and Bayesian reasoning", *The Holocene* 19.2 (2009), p. 329–334.

tion des plaques terrestres. Il est donc souvent difficile d'exclure toutes les hypothèses causales à l'exception d'une seule et la résolution de la controverse sur la crise KT serait plutôt l'exception que la règle.

Dans la section qui suit, je présente, à partir de deux études de cas, une objection à la thèse de Mayr et de Scriven selon laquelle la théorie de l'évolution n'a pas de pouvoir prédictif, et à la thèse de C. Cleland selon laquelle la méthode typique des sciences naturelles historiques n'impliquerait aucune prédiction. Cette objection est que l'activité prédictive de ces disciplines n'est pas conforme à la conception classique des prédictions parce qu'elles ne sont pas guidées par des lois : c'est pourquoi elle peut passer inaperçue alors même que son rôle est de plus en plus important.

2.2 Études de cas de prédictions guidées par des données et de prédictions guidées par des modèles

L'intérêt épistémologique d'étudier des controverses scientifiques est qu'elles sont l'occasion pour les scientifiques de revenir sur les principes de leur propre activité et clarifier les notions qu'ils emploient. Il va de soi qu'il ne faut pas tout prendre pour argent comptant dans les propos que tiennent les scientifiques à propos de leur propre activité sous prétexte qu'ils en sont les agents. Cependant, dans le cadre de telles controverses, une des manières de montrer le pouvoir prédictif d'une théorie, d'une hypothèse ou d'un modèle est de faire référence à une recherche admise par tous comme étant un succès, puis de prouver qu'il s'agit d'un cas indéniable de prédiction. Ces controverses obligent donc les scientifiques à expliciter ce qu'ils entendent par prédiction et les étapes de leurs raisonnements prédictifs.

C'est pourquoi il est plus aisé de montrer que plusieurs formes de raisonnements prédictifs coexistent dans des disciplines où ont lieu ce genre de controverses. Dans ce qui suit on examine deux exemples de recherches, l'un en biologie de l'évolution, l'autre en géomorphologie, qui

se réclament prédictifs, et qui poursuivent explicitement des fins prédictives mais qui mobilisent des raisonnements ayant une autre structure que celle de la conception classique des prédictions étudiée au chapitre précédent. Ces études de cas permettent ainsi d'identifier la structure des prédictions guidées non par des lois mais par des *données* ou des *modèles*.

2.2.1 Prédiction d'événements évolutifs guidés par des données

Dans un article de 2009, le philosophe de la biologie Rasmus Winther fournit des exemples de prédictions issues de la théorie de la sélection naturelle³⁰. Il souligne que celles-ci sont à la fois capable de réfuter cette théorie (« risquées ») et propres à cette théorie (« surprenantes »). Ces exemples portent sur des expériences réalisées en laboratoire par Richard Lenski, qui a soumis douze lignées d'*E. Coli* à la même pression sélective sur 30 000 générations pendant presque vingt ans, et a observé, conformément à la prédiction de la théorie de la sélection naturelle, une évolution parallèle des lignées.

Cependant, ce cas ne serait pas probant pour une partisans de la thèse de Mayr et Scriven. En effet, elle pourrait aisément argumenter qu'il s'agit d'un cas de biologie expérimentale qui illustre la thèse selon laquelle la biologie n'est prédictive que dans un contexte expérimental, sans que cela ne prouve que les disciplines biologiques qui sont des sciences naturelles historiques soient prédictives³¹.

À l'inverse, le cas que l'on propose d'étudier ici appartient clairement au domaine de la théorie de l'évolution. Il s'agit des recherches menées depuis la fin des années 2000 par deux biologistes, Virginie Orgogozo, spécialiste de l'organisme modèle *Drosophila melanogaster* de l'Université Paris VI, et David Stern, spécialiste de biologie du développement à

³⁰Rasmus WINTHER, "Prediction in Selectionist Evolutionary Theory", *Philosophy of Science* 76 (2009), p. 889–901.

³¹R. Winther propose un deuxième cas de prédictions, celles réalisées par Margulis à partir de l'hypothèse selon laquelle les organelles intracellulaires des cellules eucaryotes sont des cellules incorporées suite à une symbiose. Cependant, il n'est pas clair que la théorie de la sélection naturelle joue un rôle important dans ces prédictions, voilà pourquoi je ne les discute pas ici.

Princeton ³².

Le résultat de ces recherches permet, selon eux, de prédire l'évolution génétique d'une espèce. Il ne s'agit donc pas de prédire des événements évolutifs comme l'apparition ou l'extinction d'une espèce, mais de prédire quels *loci* des chromosomes sont les plus susceptibles de muter pour une espèce donnée — phénomène qui, selon Scriven et Mayr, est impossible à prédire et représente une des deux sources d'aléatoire rendant la biologie évolutive incapable de faire aucune prédiction.

Une hypothèse largement répandue est que la plupart des mutations ayant un rôle dans l'évolution d'une espèce prennent place dans les régions *cis*-régulatoires des gènes³³. En effet, les gènes sont composés de deux régions différentes (voir figure 2.1) : l'une encodant un produit (une protéine, une molécule d'ARN, etc.), l'autre (la région *cis*-régulatoire) encodant les instructions qui déclenchent ou inhibent l'expression de ce produit. Or, la plupart des gènes ont des effets « pléiotropiques », c'est-à-dire affectant de nombreux autres gènes : une mutation dans la région codante d'un gène pléiotropique peut donc, par effet domino, avoir des effets délétères sur l'ensemble de l'organisme et le rendre non-viable. En revanche, un changement dans la *cis*-région d'un gène ne fait qu'« éteindre » ce gène en évitant ces effets négatifs : c'est pourquoi on peut faire l'hypothèse que ce type de mutation serait, le plus souvent, responsable d'évolution adaptatives.

C'est cette hypothèse qu'examinent et utilisent V. Orgogozo et D. Stern à des fins prédictives. Il va de soi que je ne discute pas ici la validité ou la portée de ces travaux récents en biologie : c'est la manière dont ces deux chercheurs réalisent leurs prédictions qui nous intéresse ici, que celles-ci soient ou non, par la suite, confirmées. Et cette manière de réaliser des prédictions me semble particulièrement représentative des raisonnements

³²Je m'appuie ici principalement sur les deux articles publiés par V. Orgogozo et D. Stern sur cette question : Virginie ORGOGOZO et David STERN, "The Loci of evolution : how predictable is genetic evolution?", *Evolution* 62.9 (2008), p. 2155–2177, et ORGOGOZO et STERN, "The Loci of Evolution". On trouve aussi ces résultats exposés, ainsi que d'autres recherches sur la prédiction des mutations génétiques, dans le livre de Stern : David STERN, *Evolution, Development, and the Predictable Genome*, Yosemite, Roberts & Company Publishers, 2010.

³³Virginie ORGOGOZO et David STERN, "Is Genetic Evolution Predictable?", *Science* 323.5915 (2009), p. 746–751, p. 747.

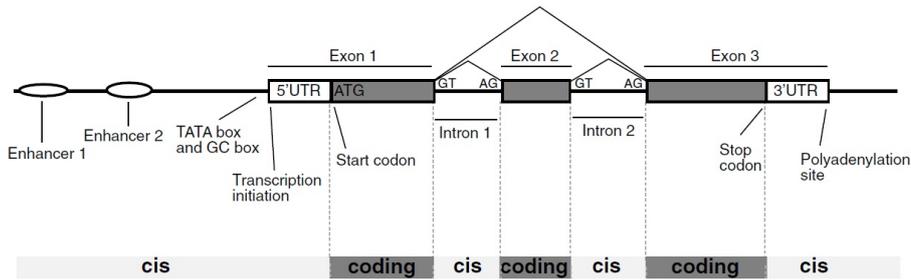


FIGURE 2.1 : Régions codantes et *cis*-régions d'un gène. Les rectangles gris indiquent les portions d'ADN qui encodent une protéine. Les rectangles blancs indiquent les portions d'ADN qui permettent à ces portions d'être transcrites : ce sont ces régions que l'on appelle *cis*-région des gène. Source : Virginie ORGOGOZO et David STERN, "The Loci of evolution : how predictable is genetic evolution ?", *Evolution* 62.9 (2008), p. 2155–2177, p. 2157.

prédictifs concrètement réalisés en biologie évolutive.

En premier lieu, V. Orgogozo et D. Stern ne mentionnent aucune « loi ». Ils soulignent au contraire qu'ils n'essayent pas de généraliser l'hypothèse selon laquelle les mutations évolutives ont lieu dans les *cis*-régions des gènes. Cette hypothèse ne sert que comme hypothèse de travail, comme esquisse de généralisation fondée sur des considérations théoriques à propos de la pléiotropie qui laisse de côté de très nombreux facteurs qui peuvent avoir autant d'importance que la pléiotropie. Seule l'utilisation de nombreuses données concernant ces autres facteurs — qui ne sont pas forcément d'origine génétique, et relève donc d'autres disciplines biologiques comme l'épigénétique — peut, selon V. Orgogozo et D. Stern, rendre l'évolution génétique prévisible :

Les arguments théoriques fournissent des raisons de penser que l'évolution phénotypique est dominée par l'évolution *cis*-régulatoire, mais d'autres forces évolutives comme la taille de la cible de la mutation, ou l'histoire démographique de la population, peuvent perturber cette tendance. La question de l'importance de l'évolution *cis*-régulatoire sera réglée en dernière instance par les données empiriques³⁴.

³⁴ORGOGOZO et STERN, "The Loci of Evolution", p. 2163.

C'est le second point important de la méthode prédictive de V. Orgogozo et D. Stern : afin d'étudier le rôle de ces facteurs dans l'évolution à court et à long terme, V. Orgogozo et D. Stern ne recourent pas à une méthode expérimentale (bien que les mouches drosophiles sur lesquelles travaille V. Orgogozo soient parmi les organismes modèles les plus manipulés expérimentalement), mais construisent et utilisent une base de données d'études compilant des mutations génétiques à l'origine de variations phénotypiques. Cette base de donnée, disponible sur le site web de la revue *Evolution*, regroupe les 332 études de cas de mutations ayant eu un impact phénotypique, chacun de ces cas étant accompagné de 45 informations sur la localisation du gène, les espèces impliquées, etc. Bien que le nombre de données ainsi atteint ne soit pas effrayant, il est bien supérieur au nombre de données normalement utilisées pour appliquer une loi physique à une situation expérimentale car aucune loi n'est disponible qui donne *a priori* les facteurs importants à prendre en compte et donc les données à observer.

De plus, il est probable que ces données ne soient pas toutes pertinentes : elles sont ici pour servir à l'analyse statistique, et ne concernent pas un ensemble d'entités et de propriétés déjà définies théoriquement. Une telle base de données ne sert donc pas uniquement à tester ou induire une loi scientifique : elle est susceptible de révéler différentes informations sur les facteurs d'origines diverses qui affectent les mutations. Le tri entre données pertinentes et données non-pertinentes pour la prédiction se fait ainsi après avoir récoltées les données, et non avant comme dans un contexte de prédiction guidées par des lois.

Ainsi, en comparant les cas de mutations intraspécifiques et interspécifiques, V. Orgogozo et D. Stern peuvent comparer les mutations de l'évolution à long terme et de l'évolution à court terme. Les mutations à long terme sont celles qui ont été testées dans une grande variété d'environnements, et qui maintiennent une forme de plasticité d'adaptation pour faire face à ces nouveaux environnements. Or, si les mutations pléiotropiques sont susceptibles de favoriser l'adaptation rapide à de nouveaux environnements, elles provoquent une baisse de plasticité, et seraient donc bien moins favorables sur le long terme. Afin de tester cette prédictions,

V. Orgogozo et D. Stern appliquent une forme d'analyse statistique, le test de Fisher³⁵. D'autres facteurs peuvent ensuite être analysés de la même manière et recoupés avec la distinction entre mutation à court terme et à long terme, comme le type de mutation phénotypique (morphologique ou physiologique) ou le type de gènes³⁶.

C'est là le troisième point important de la méthode de V. Orgogozo et D. Stern : ils utilisent des outils statistiques pour pouvoir, à partir de leur large base de données, extraire et recouper différents facteurs qui jouent sur la corrélation entre mutation dans une *cis*-région et évolution phénotypique. Lorsque Hempel parle de prédiction dérivée d'une loi statistique-probabiliste, il décrit un processus de quasi-déduction dans lequel les prémisses du raisonnement et sa conclusion sont liées par une forte probabilité à défaut d'une implication logique. Le raisonnement prédictif de V. Orgogozo et D. Stern est une induction à partir d'une base de données qui analyse le rapport entre la variance de plusieurs variables, c'est-à-dire leur corrélation, qu'elle soit fréquente ou non. Au lieu de ne prendre en compte que les facteurs importants d'un phénomène, les prédictions de V. Orgogozo et D. Stern cherchent à prendre en compte tous les facteurs en les pondérant grâce à une analyse statistique sur leur base de données.

En dernier lieu, les travaux de V. Orgogozo et D. Stern montrent que leurs prédictions se font en utilisant d'autres sciences biologiques que la biologie évolutive comme la génétique, l'épigénétique et la biologie du développement, surtout lorsqu'il s'agit de réaliser la prévision précise d'une mutation susceptible d'affecter l'évolution d'une espèce donnée. En effet, durant le développement d'un organisme, la position d'un gène dans son réseau génétique de régulation est un facteur déterminant. V. Orgogozo et D. Stern soutiennent ainsi que le développement des poils de soie — des organes sensoriels qui poussent sur le dos de la mouche drosophile — est affecté par un grand nombre de gènes mais qu'un seul, nommé *scute*, est à une place telle qu'il reçoit de très nombreux signaux de régulation et active de nombreux autres gènes (cf. figure 2.2.1). Il est donc responsable

³⁵Ce test statistique est exposé plus en détail dans le chapitre 7, section 7.1.2.

³⁶ORGOGOZO et STERN, "The Loci of Evolution", p. 2168.

de la différenciation de quasiment toutes les cellules du dos des mouches.

V. Orgogozo et D. Stern nomment ce genre de gènes des « points chauds » (*hot spot genes*) pour indiquer leur place cruciale dans le réseau de régulation génétique. Leur prédiction prend donc la forme suivante : les mutations génétiques ayant un effet phénotypique susceptible d'être avantageux pour la mouche drosophile ont une forte probabilité d'avoir lieu dans les régions *cis*-régulateurs des points chauds du réseau génétique de développement de cette mouche³⁷. Cette prédiction est probabiliste et résulte de la convergence d'informations qui proviennent de différents domaines de la biologie : biologie évolutive, biologie du développement, génétique, biologie des populations, physiologie et morphologie. La conclusion de leur article de 2008 souligne ce point : « En regroupant la génétique de l'évolution et du développement, les biologistes peuvent être capables de prédire, en un sens probabiliste, les mutations sous-jacentes aux évolutions phénotypiques ».

Si l'on reprend les caractéristiques des recherches de V. Orgogozo et D. Stern relevées ci-dessus, on peut caractériser la structure de la prédiction qu'ils réalisent par quatre points :

1. Cette prédiction ne donne une place centrale ni à des lois ni à des généralisations empiriques qu'elle permettrait de tester. *A fortiori*, elle n'est pas la conséquence d'une seule théorie organisée de manière axiomatique et hiérarchique.
2. Cette absence de loi est palliée par la construction et l'utilisation de « méta-études », c'est-à-dire de bases de données regroupant un nombre important de résultats d'études précédentes d'origine et de nature diverses.
3. Pour formuler et tester une telle prédiction, on utilise des tests statistiques sur cette base de données : cela permet de prendre en compte les nombreux facteurs de nature différente et leurs interactions qui interviennent dans un système ouvert comme celui d'un organisme.

³⁷ORGOGOZO et STERN, "Is Genetic Evolution Predictable?", p. 747.

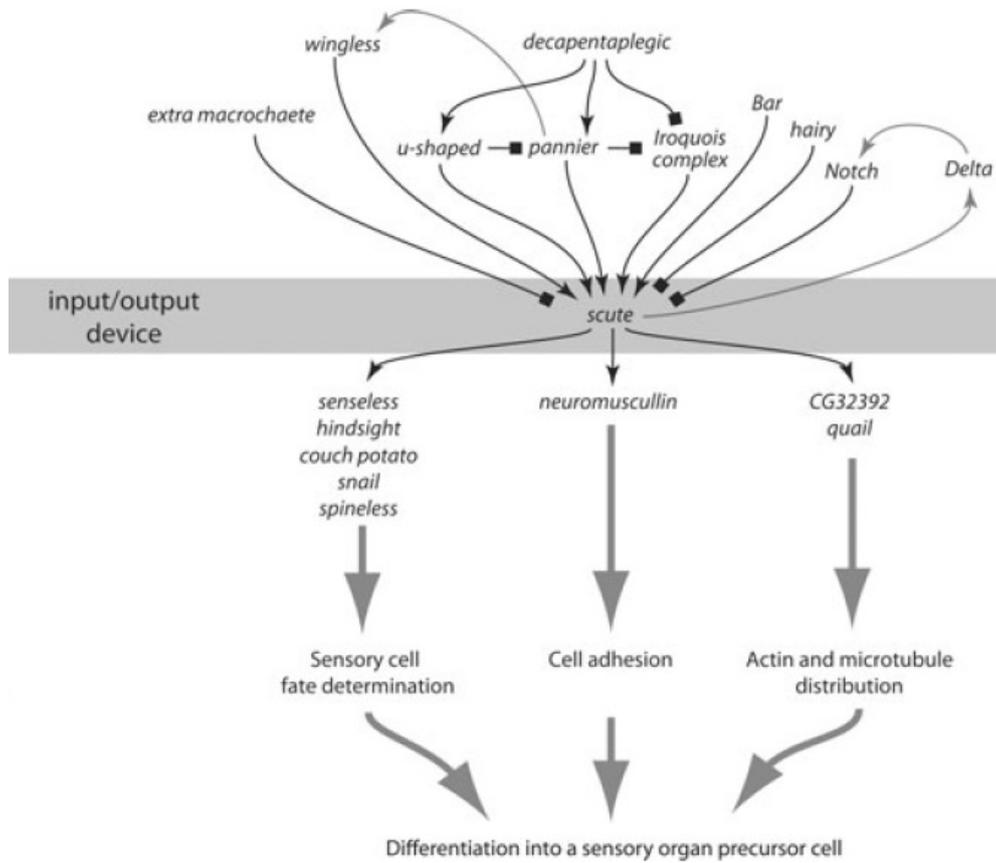


FIGURE 2.2 : Ce schéma représente une partie du réseau génétique de régulation des poils de soie de *Drosophila melanogaster*. Le gène *scute* est affecté par les mutations de beaucoup d'autres gènes (comme *wingless*, *Bar*, *hairy*, ...) et déclenche des effets phénotypiques qui aboutissent à la différenciation des cellules du dos de la drosophile en soie (bas du schéma). Ce gène est donc un « point chaud » (*Hot spot gene*), c'est-à-dire un gène dont la mutation est susceptible d'affecter le phénotype de la drosophile. Source : Virginie ORGOGOZO et David STERN, "The Loci of evolution : how predictable is genetic evolution ?", *Evolution* 62.9 (2008), p. 2155–2177, p. 2170.

4. La formulation de ce type de prédiction nécessite la convergence de données, d'hypothèses (comme l'hypothèse des « hot spot genes ») et de modèles (comme le modèle du réseau de régulation des gènes de la drosophile gouvernant le développement des poils de soie) qui proviennent de disciplines différentes.

Il est difficile de refuser aux travaux de V. Orgogozo et D. Stern le titre de « prédictions » : ils permettent bien, par une série d'inférences, de déterminer quels sont les *loci* d'un génome susceptible de muter sous une pression sélective donnée ³⁸. Autrement dit, les résultats de V. Orgogozo et D. Stern permettent bien de définir une méthode pour fixer, avec une certaine probabilité, la valeur de la variable concernant les *loci* d'un génome qui ont une importance évolutive, sans avoir à la mesurer ou à l'observer.

La structure de cette prédiction diffère donc sur plusieurs points de la conception classique des prédictions scientifiques représentée par le modèle des prédictions guidées par des lois proposé dans le chapitre précédent (voir section 1.4) :

1. Les lois n'y jouent pas un rôle essentiel, mais les *données* sont en revanche indispensables.
2. Les prédictions sont inférées à partir de ces données en utilisant des *procédures d'analyse statistique*.
3. Ces données visant à étudier l'interaction d'un grand nombre de facteurs de nature différente, cette forme de prédiction est nécessairement *multidisciplinaire*.

Pour désigner ce type de raisonnement prédictif, on parlera de *prédictions guidées par des modèles*.

³⁸Certes, il ne permettent pas de prédire quels seront les changements de milieu qui feront varier cette pression sélective : c'est la tâche de la climatologie, de la géologie et de l'écologie scientifique. Cependant, on montre dans la section suivante qu'il est tout à fait possible, dans certains de ces domaines, de recourir à des prédictions qui réduisent la part d'aléatoire qui les rendaient parfaitement imprévisibles aux yeux de Mayr et de Scriven.

Les prédictions guidées par des données sont caractéristiques des contextes non-expérimentaux³⁹ et diffèrent radicalement des prédictions guidées par des lois que cherchaient, sans les trouver, Mayr et Scriven en biologie évolutive et C. Cleland dans la méthodologie des sciences naturelles historiques.

Dans un article de 1982 sur les prédictions de la théorie de l'évolution, M. Williams reconnaît que, contrairement à ce qu'elle a soutenu une décennie plus tôt, « une partie de la raison pour laquelle on a échoué à reconnaître les prédictions de la théorie de l'évolution est que l'on cherchait des prédictions qui ressemblaient aux prédictions de la physique »⁴⁰ (ce qui signifie, dans le cadre de cet article, des prédictions à partir de la résolution d'équations différentielles). Il me semble que l'on peut généraliser cette remarque : si l'on a échoué à reconnaître des prédictions portant sur l'évolution des espèces, c'est que l'on a cherché des prédictions correspondant à la conception classique des prédictions, c'est-à-dire des prédictions *guidées par des lois*. Au contraire, si l'évolution d'une espèce ou de son génome est bien un processus multifactoriel affectant des systèmes ouverts soumis à de nombreuses perturbations, ce sont les prédictions *guidées par des données* qui peuvent servir à la biologie évolutive et que l'on doit rechercher pour juger du pouvoir prédictif de cette discipline.

Dans la section qui suit, on étudie un cas de prédictions en géologie qui révèle une troisième et dernière forme de raisonnement prédictif : les prédictions guidées par des modèles.

³⁹Dans le cas de V. Orgogozo et D. Stern, ceux-ci excluent explicitement de leurs données les résultats expérimentaux : « Nous n'avons pas inclus les variations sélectionnées dans des expériences de laboratoires » ORGOGOZO et STERN, "The Loci of Evolution", p. 2164. Cela ne signifie pas que des études expérimentales ne sont pas parfois reportées dans les méta-études qui servent de base de données. Mais comme on l'a vu dans le cas des géomorphologistes, certains scientifiques des sciences naturelles historiques sont particulièrement réticent à extrapoler les résultats d'expériences de laboratoire consistant à modéliser et à contrôler des systèmes ouverts.

⁴⁰WILLIAMS, "The Importance of Prediction Testing in Evolutionary Biology", p. 297.

2.2.2 Prédications géologiques guidées par des modèles

Depuis 1994, le géologue Brad Murray, de l'Université de Duke, a développé, avec le géologue Chris Paola de l'Université du Minnesota, ce qu'ils ont appelé un « modèle cellulaire des rivières en tresses » (*braided river*), c'est-à-dire un ensemble de règles qui permettent de simuler numériquement l'apparition de ces cours d'eau ayant de nombreux bras se recoupant et formant un réseau complexe (voir figure 2.2.2 pour une illustration de ce phénomène)⁴¹. Ce modèle, ainsi que d'autres développés par Murray, a explicitement pour but d'expliquer et de prédire la formation de rivières de ce type⁴². Mais la particularité de ce modèle est qu'il s'écarte singulièrement des autres modèles utilisés pour prédire ce phénomène, ce qui a amené Murray à défendre qu'il existe différents types de modèles prédictifs — et donc de prédictions — des phénomènes géomorphologiques.

Selon B. Murray, les modèles prédictifs des rivières en tresses qui ont été proposés jusqu'ici sont des modèles de « *simulation* » car ils cherchent à reproduire le plus de détails possibles du système qu'ils représentent. Ils ont les deux caractéristiques suivantes :

1. Ils sont « explicitement réductionnistes » : ils cherchent à « simuler explicitement les processus à des échelles les plus petites possibles, étant données les limites de nos connaissances et de nos capacités de calculs »⁴³.
2. Ils sont « fondés sur des équations » : pour représenter la dynamique et les interactions des différentes parties d'un modèle de ce type, les scientifiques « commencent par [inclure] les équations par-

⁴¹Brad MURRAY et Chris PAOLA, “A cellular model of braided rivers”, *Nature* 371.6492 (1994), p. 54–57.

⁴²Brad MURRAY, “Reducing model complexity for explanation and prediction”, *Geomorphology* 90.3-4 (2007), p. 178–191, p. 178.

⁴³Brad MURRAY, “Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations”, *Prediction in geomorphology*, sous la dir. de Peter WILCOCK et Richard IVERSON, American Geophysical Union, 2003, p. 151–165, p. 152.



FIGURE 2.3 : Vue aérienne de la rivière Murchison (Australie Occidentale). Les divisions de la rivière se recourent en plusieurs points, donnant le nom de « rivière en tresses » ou d' « anastomoses » aux cours d'eau de ce type. Source : WikiCommons.

tielles pertinentes, les simplifient autant que nécessaire, choisissent un type de solution et définissent des conditions aux limites »⁴⁴.

Ainsi ces modèles cherchent à représenter la rivière comme un fluide descriptible par une approximation des équations de Navier-Stokes à deux dimensions et les sédiments comme des particules s'empilant pour former des barrières sous l'effet de leur frottements, de la pression et du poids⁴⁵.

On pourrait être tenté de voir dans ces modèles de simulation l'équivalent, en géomorphologie, des prédictions guidées par des lois. Ce serait cependant aller trop vite. B. Murray donne l'exemple de plusieurs facteurs, comme le coefficient de frottement des sédiments, qui ne sont pas explicitement calculés, mais seulement « paramétrisés » :

Par exemple, l'effet lissant qu'ont les turbulences de petite échelle sur les gradients de vitesse d'un courant est traité par l'introduction d'un paramètre, et non en simulant explicitement les mouvements de turbulence, et les modèles de transport de sédiments à l'échelle dans les canaux emploient des relations concernant de grands volumes de sédiments plutôt que de traiter le mouvement de chaque grain individuellement.⁴⁶

Ainsi, ces modèles de simulation ne réalisent pas des prédictions guidées par des lois, mais par des équations différentielles qui sont des approximations de certaines lois physiques (comme les équations de Navier-Stokes) et/ou des généralisations empiriques paramétrées à partir d'études en laboratoire et sur le terrain. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de données, à la fois sur le relief que l'on étudie, mais aussi sur les résultats d'autres recherches. Ces prédictions ressemblent donc bien plus en réalité aux prédictions guidées par des données étudiées dans la section précédente, qui sont réalisées à partir de larges bases de données variées.

⁴⁴MURRAY, "Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations", p. 154.

⁴⁵MURRAY, "Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations", p. 157.

⁴⁶MURRAY, "Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations", p. 152.

B. Murray propose lui un modèle qu’il qualifie d’« *exploratoire* » ou de « *modèle à complexité réduite* ». Ce type de modèle prédictif a des caractéristiques différentes des modèles de *simulation* :

1. Ils utilisent une approche « de haut en bas » (*top-down*) : ils ne privilégient pas les constituants et les processus opérant à la plus petite échelle possible, mais « traitent les interactions définies entre les variables définies à des échelles comparables à celle du phénomène étudié ; seuls les *effets* qu’ont les processus à petite échelle de temps et d’espace sur l’échelle étudiée sont explicitement inclus »⁴⁷.
2. Les équations utilisées dans ces modèles « représentent les premières estimations à propos d’interactions de grande échelle, qui n’ont pas à être aussi quantitativement précises que des paramétrisations fondées sur de nombreux tests empiriques »⁴⁸.

Ainsi, le modèle de rivière en tresses proposé par B. Murray et C. Paola consiste à représenter le lit de la rivière sous la forme d’une grille, dont chaque case peut être inondée ou non en fonction de deux mécanismes – l’écoulement de l’eau et des sédiments en fonction du dénivelé et le transport latéral de sédiment – et six règles qui sont suffisants, selon B. Murray et C. Paola, pour voir apparaître un système de tresses (voir figure 2.2.2)⁴⁹.

Je ne discuterai pas plus la validité de ce modèle géologique que j’ai discuté celle des recherches de V. Orgogozo et D. Stern en biologie évolutive, mais je soutiens que ce modèle est un raisonnement prédictif ayant une structure spécifique : les prédictions guidées par des modèles.

Il pourrait sembler que les modèles simplifiés comme les modèles exploratoires de B. Murray et C. Paola sont trop imprécis pour réaliser

⁴⁷MURRAY, “Reducing model complexity for explanation and prediction”, p. 180.

⁴⁸MURRAY, “Reducing model complexity for explanation and prediction”, p. 182.

⁴⁹Ce type de modèle a pour ancêtre les automates cellulaires comme le jeu de la vie de John Conway, dans lequel l’état de chaque cellule de la grille est déterminé, à chaque itération, par trois règles reliant cet état à celui des cellules voisines. Tout l’intérêt de ces automates cellulaires, pour un géomorphologiste comme B. Murray, est de montrer que « d’intéressantes formes peuvent apparaître spontanément par les interactions simples internes au systèmes » MURRAY, “Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations”, p. 159.

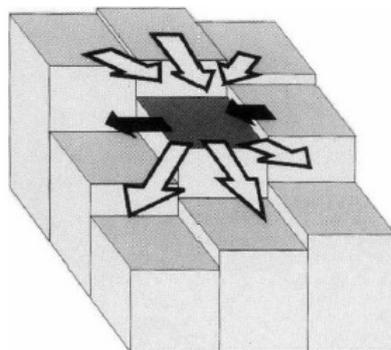


FIGURE 2.4 : Le modèle Murray-Paola des rivières en tresse. Le cours d'eau est représenté comme un automate cellulaire, c'est-à-dire comme un ensemble de cases dont l'état dépend des cases adjacentes. Ainsi, dans ce modèle, le débit d'une case en aval vers trois cases en amont se fait en fonction de deux mécanismes, eux-mêmes réglés par six équations. Les flèches blanches indiquent les décharges d'eau et de sédiments d'une cellule à l'autre, les flèches noires représentent le transport latéral de sédiments. La longueur des flèches représentant l'intensité des mécanismes. Source : Brad MURRAY et Chris PAOLA, "A cellular model of braided rivers", *Nature* 371.6492 (1994), p. 54-57, p. 55.

d'authentiques prédictions, et qu'ils ne servent qu'à expliquer un phénomène en isolant une combinaison de facteurs déterminants. Mais s'il ne fait aucun doute que les modèles exploratoires ne peuvent pas réaliser de prédictions *sur des systèmes concrets*, ils peuvent cependant être prises en charge par les modèles de simulation grâce à leur capacité à gérer de nombreuses informations diverses, comme l'affirme explicitement B. Murray :

Ce modèle exploratoire [de rivières en tresses] est trop grossier pour être utilisé dans la prédiction de certaines propriétés manifestes des rivières en tresses. Par exemple, la règle concernant le flux de l'eau ne reproduit ni ne prédit de manière précise la distribution de l'eau le long d'une topographie réelle – ce modèle ne peut prédire avec précision la morphologie d'une rivière en tresse réelle lors d'une inondation, même si la topographie de la plaine inondée est connue⁵⁰.

⁵⁰MURRAY, "Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with sim-

B. Murray insiste ainsi sur le fait que les modèles à complexité réduite comme celui qu’il propose ont souvent de meilleurs résultats que les modèles incluant de nombreuses données sur de grandes échelles de temps et d’espace. En effet, si ces modèles sont moins précis, ils sont en revanche capables de réaliser des prédictions *robustes*, c’est-à-dire qui « ne dépendent pas des valeurs des paramètres ou des manières spécifiques dont les interactions sont représentées »⁵¹. Ces prédictions robustes peuvent sembler imprécises par rapport aux prédictions guidées par des données, mais elles gagnent en généralité ce qu’elles perdent en précision. Elles s’appliquent ainsi à de très nombreux cas et permettent de tester les modèles dont elles sont dérivées.

En effet, comme le note B. Murray, si les modèles à complexité réduite ne peuvent faire de prédictions quantitativement précises, cela ne veut pas dire qu’ils ne peuvent être testés :

Cela signifie qu’un différent type de prédiction a besoin d’être testé — une prédiction qui apparaît inévitablement des interactions basiques du modèle, et ne dépend pas des valeurs des paramètres ou du détail de la manière dont ces interactions sont traitées au sein du modèle⁵².

Ainsi, ce type de prédiction ne consiste pas à faire un calcul en prenant en compte le plus de données possibles afin de fixer le plus de paramètres possibles pour représenter dans les détails les plus exhaustifs le comportement du système que l’on étudie : il consiste à essayer différentes valeurs des variables du modèle, et à comparer le comportement du modèle dans ces différentes conditions afin de voir ce qui ne varie pas quand les valeurs de ces paramètres changent. Autrement dit, les prédictions fondées sur ces modèles simplifiées cherchent non pas à fixer la valeur de *toutes* les variables d’un système, mais à trouver quelles valeurs restent stables lorsque les autres varient. Les prédictions robustes ne permettent pas de prévoir précisément l’évolution d’un système particulier,

plified numerical models and detailed simulations”, p. 158.

⁵¹MURRAY, “Reducing model complexity for explanation and prediction”, p. 185.

⁵²MURRAY, “Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations”, p. 162.

mais elles permettent de dégager les traits communs à tous les systèmes qui appartiennent à une même classe.

Ainsi, une prédiction robuste dérivé d'un modèle à complexité réduite est susceptible de s'appliquer à d'autres systèmes que celui qui a été utilisé initialement pour construire le modèle. Ce sont donc des *extrapolations*, à la différence des prédictions tirées des modèles de simulation qui servent essentiellement à prédire le comportement du système qui a servi à en fixer les paramètres, c'est-à-dire ne sont que des *interpolations*.

Le raisonnement prédictif proposé par B. Murray n'est pas restreint aux modèles à complexité réduite de la géomorphologie. On trouve en effet dans d'autres sciences naturelles historiques des exemples de raisonnements prédictifs qui sont dérivés de modèle et qui ont les caractéristiques suivantes :

1. Ces raisonnements emploient des *modèles* qui mettent de côté certains aspects des systèmes qu'ils représentent.
2. Ils n'impliquent pas nécessairement des lois : les interactions entre les différents composants du modèle peuvent être décrits par des *hypothèses* qui servent de règles pour tirer des inférences de ce modèle.
3. Ces raisonnements sont essentiellement *incomplets* : ils ne permettent pas de fixer la valeur de toutes les variables impliquées dans la description du système.
4. La contrepartie est que ces raisonnements aboutissent à des prédictions *robustes*, c'est-à-dire qui portent sur une classe de système et non un système particulier.

Pour désigner ce type de prédiction, on emploie ici le terme de prédiction « *guidée par des modèles* », afin de bien les distinguer des prédictions guidées par des lois définies dans le chapitre 1 et de celles guidées par des données définies dans la section précédente.

Les prédictions guidées par des modèles sont particulièrement intéressantes dans le cadre de cette thèse parce qu'elles héritent à la fois du

caractère simplifié voire idéalisé des prédictions guidées par des lois et du caractère pragmatique des prédictions guidées par des données parce qu'il n'y a pas besoin de connaître les lois d'un système pour le modéliser. Elles représentent ainsi une structure de raisonnement prédictif intermédiaire qui est utilisée aussi bien dans les sciences expérimentales qu'historiques.

2.2.3 Clarifications sur la notion de modèle et conclusion de la section

Cependant, en utilisant le terme de « modèle », je m'expose à de nombreuses confusions possibles, tant ce terme est polysémique et polémique. Même s'il n'est pas possible ici de clarifier tous ses différents sens, il est nécessaire de préciser pourquoi on a choisi cette appellation. Le terme « modèle » en philosophie des sciences a au moins quatre significations :

- Sens 1 Un modèle est une interprétation logique d'un système d'énoncés formulés dans un langage donné. C'est le sens du mot modèle que l'on emploie dans l'expression « théorie des modèles » par exemple.
- Sens 2 Un modèle est une version d'une théorie ou d'une hypothèse que l'on obtient en fixant un certain nombre de paramètres libres dans les équations de cette théorie ou hypothèse. C'est ainsi que l'on parle de modèle statistique linéaire (lorsqu'on fixe les paramètres a et b d'une régression linéaire de la forme $y = ax + b$) ou de modèle d'Univers (lorsqu'on fixe les quatre paramètres libres qui interviennent dans l'équation de Friedman-Lemaître).
- Sens 3 Un modèle est une représentation concrète ou abstraite d'un système qui ignore ou déforme volontairement certaines de ses propriétés pour représenter ses autres propriétés et leur comportement.
- Sens 4 Un modèle est toute forme d'hypothèse, de concepts ou d'équations utilisés par des scientifiques pour représenter un objet cible, que celui-ci soit un système réel ou un autre modèle. C'est ainsi que pour les géomorphologistes P. Wilcock et R. Iverson « un modèle peut

être défini de façon générale comme un concept ou un ensemble de concepts liés entre eux afin d'expliquer une partie de la réalité »⁵³.

Ces différents sens n'étant pas incompatibles, bien souvent ils se recoupent. Comme la plupart des géomorphologistes et des scientifiques, B. Murray emploie par exemple le terme de modèle au sens 4, ce qui lui permet de regrouper les simulations utilisant un grand nombre de données et les modèles à complexité réduite sous le même terme de modèle. Cependant, si l'on utilise le terme de modèle au sens 3, alors seuls ces derniers sont réellement des modèles.

Peter Godfrey-Smith a soutenu qu'en adoptant la définition 3 du terme modèle « il devient possible de reconnaître et d'analyser la science fondée sur des modèles (*model-based science*) comme un style particulier de travail scientifique, qui fournit des types particuliers de représentation et d'explication »⁵⁴. J'emploie le terme de modèle en ce sens lorsque je nomme le type de prédiction que réalisent B. Murray et C. Paola des « prédictions dirigées par des modèles » : c'est la structure des raisonnements prédictifs de cette activité scientifique spécifique fondée sur des modèles.

En résumé, on peut donc distinguer deux types de prédictions que l'on a identifiés à partir d'études de cas dans cette section : les prédictions guidées par des données et par des modèles. Ils permettent tout deux de répondre aux arguments soulevés par C. Cleland contre la possibilité de prédiction dans la méthodologie typique des sciences naturelles historiques. Ce n'est pas parce que certaines disciplines visent à rendre compte d'événements particuliers prenant place dans une histoire qu'elles ne peuvent pas avoir de pouvoir prédictif. C. Cleland soutient que la complexité des facteurs causaux dans les systèmes qu'étudient ces disciplines empêche de réaliser des inférences prédictives, car on ne dispose pas de lois déterministes ou statistiques qui identifieraient un ou plusieurs facteurs déterminants. Cependant, les scientifiques de ces disciplines arrivent à formuler et à tester des prédictions en se passant des lois qui semblent

⁵³WILCOCK et IVERSON, "Prediction in geomorphology", p. 4.

⁵⁴Peter GODFREY-SMITH, "The strategy of model-based science", *Biology and Philosophy* 21.5 (2006), p. 725-740, p. 740.

nécessaires à C. Cleland, en recourant soit à des modélisations, soit à de nombreuses données et en réalisant des inférences statistiques sur ces données⁵⁵.

Dans la section suivante, je montre que si les prédictions dirigées par des données ont longtemps pu être éclipsées par la conception classique des prédictions guidées par des lois, l'apparition de grandes bases de données numérisées et d'outils spécifiques destinés à leur utilisation scientifique donne aujourd'hui une place importante à ces prédictions et mettent en lumière certains problèmes spécifiques à la logique des prédictions scientifiques.

2.3 Prédire et expliquer à partir des *Big Data*

Les prédictions guidées par les données n'ont pas joué un rôle de premier plan tant que les bases de données utilisées par des scientifiques étaient de petite taille et peu nombreuses. Ces prédictions ne pouvait servir qu'à compléter par interpolation certaines données manquantes dans la base empirique d'une expérience (voir chapitre 1, section 1.3.3). C'est pourquoi seules les prédictions guidées par des lois — et, dans une moindre mesure, celles guidées par des modèles — sont souvent considérées comme des succès scientifiques.

Cependant, avec l'augmentation des capacités de stockage et de traitement informatique des données, la taille des bases de données à disposition des scientifiques a grandi exponentiellement dans de nombreux domaines⁵⁶.

⁵⁵Il n'en reste pas moins que la méthode que décrit Cleland semble particulièrement bien adaptée aux sciences historiques *non naturelles* — c'est-à-dire l'historiographie — dans lesquelles il semble qu'aucune recherche à but prédictif n'ait été sérieusement entreprise ni testée.

⁵⁶Eric Schmidt, l'ancien directeur exécutif de Google, estime ainsi que « de l'aube de la civilisation jusqu'à 2003, l'humanité a généré cinq exabits [10^{18} bits] de données. Aujourd'hui nous produisons cinq exabits tous les deux jours » (cité par Eve McCULLOCH, "Harnessing the Power of Big Data in Biological Research", *Bioscience* 63.9 (2013), p. 28). Ces chiffres sont difficilement vérifiables mais d'autres données confirment que la croissance des bases de données est exponentielle : dans la banque de données génétiques de l'European Molecular Biology Laboratory, l'European Nucleotide Archive par exemple, 54 milliards de nucléotides ont été enregistrés entre juin et septembre 2013, soit autant qu'entre 1982 et 2004 (Source :

Cette augmentation de la taille des bases de données, ainsi que leur ouverture à tous les chercheurs, ont ainsi permis de réaliser des prédictions quantitativement précises. Ces prédictions ont rencontré de nombreux succès dans des domaines comme l'écologie, la météorologie ou la médecine préventive où peu de lois scientifiques sont disponibles et où même les modèles les plus détaillés restent trop idéalisés pour s'appliquer à des situations concrètes.

C'est pour désigner de telles bases de données que furent introduits des termes comme « données massives », « déluge de données » ou « *Big Data* », terme aujourd'hui le plus employé, aussi bien dans le monde de la recherche que dans celui de la grande distribution, des marchés financiers ou de la sécurité internationale. On utilisera ici ces termes malgré le flou qui les entoure⁵⁷, est fréquemment lié, dans la plupart des cas, à des recherches à but prédictif : ces nombreuses données sont destinées à décrire le comportement d'individus ou de systèmes naturels ouverts en recoupant de nombreuses variables afin de pouvoir repérer des schémas récurrents dans ces comportements et être capable de les anticiper.

Dans cette section je n'étudie ce phénomène que dans un contexte de recherche scientifique. Je ne désigne donc par « *Big Data* » que l'augmentation des données scientifiques et de leurs moyens de traitement pour réaliser des prédictions. En effet, mon objectif n'est pas de rendre compte du phénomène des *Big Data* sous tous ses aspects mais d'étudier comment il donne une importance nouvelle aux prédictions dirigées par des données en augmentant la capacité prédictive de certaines théories et disciplines scientifiques.

2.3.1 La spécificité des *Big Data*

Si l'on ne définit les *Big Data* que comme l'augmentation des données disponibles et de leur capacité de traitement, il faut reconnaître qu'il ne

<http://www.ebi.ac.uk/ena/about/statistics>).

⁵⁷Comme le remarque Luciano Floridi, professeur de philosophie et d'éthique de l'information à l'Université d'Oxford, « malgré l'importance de ce phénomène, ce que signifie le terme "*Big Data*", et donc ce à quoi il réfère, est peu clair » Luciano FLORIDI, "Big data and their epistemological challenge", *Philosophy & Technology* (2012), p. 1–3, p. 1.

s'agit pas d'un phénomène nouveau mais d'un processus que les historiens des sciences font remonter au moins au milieu du XIX^e siècle avec l'apparition et la généralisation des études statistiques dans différents domaines des sciences de la nature et des sciences humaines⁵⁸. On pourrait d'ailleurs admettre que l'utilisation intensive de données massives n'est que le dernier épisode d'une longue transformation des pratiques scientifiques ayant commencé avec l'utilisation des premières méthodes statistiques pour formuler et tester des hypothèses.

Cependant, en ce qui concerne la question de différents types de prédiction, définir les *Big Data* comme un grand volume de données n'est pas suffisant. Les *Big Data* sont caractérisée aussi et surtout par le fait que ces données soient numérisées et qu'il est donc possible d'y avoir accès avec des outils informatiques. Cela explique notamment pourquoi les questionnements sur les grands volumes de données et leur capacité à réaliser des prédictions soient apparus dans les années 1990, décennie qui a vu la généralisation d'ordinateurs et de réseaux informatiques bon marché, qui sont ainsi devenus un outil dans la quasi-totalité des domaines de recherche.

Ce lien entre l'utilisation d'outils informatiques, d'importants volumes de données et la capacité prédictive, est fait explicitement par P. Wilcock et R. Iverson dès la première phrase de leur ouvrage sur les prédictions en géomorphologie : « la disponibilité, de plus en plus répandue, d'une importante puissance de calcul et la capacité d'acquérir des données volumineuses, ont le potentiel d'augmenter la précision et la pertinence des prédictions en géomorphologie »⁵⁹. En effet, la capacité d'utiliser des ordinateurs et de larges bases de données a permis l'émergence, en géomorphologie, de modèles de « simulation » (voir section précédente) dont on dérive des prédictions quantitatives détaillées. Les données de ces bases ont la particularité d'être de nature très diverse : elles concernent la topographie étudiée, les taux de sédimentation

⁵⁸A ce sujet, voir notamment : Lorenz KRUGER, Lorraine DASTON et Michael HEIDELBERGER, *The Probabilistic revolution, Vol. 1 : Ideas in history; Vol. 2 : Ideas in the sciences*, The MIT Press, 1987; Theodore PORTER, *The Rise of statistical thinking, 1820-1900*, Princeton, Princeton University Press, 1986.

⁵⁹WILCOCK et IVERSON, "Prediction in geomorphology", p. 3.

ou les coefficients de frottement entrant dans les équations de transports de sédiments. Elles sont aussi d'origine très variée : elles peuvent venir de travaux sur le terrain, d'expérience de laboratoire ou de simulations. Comme on l'a vu dans le cas des recherches sur l'évolution de V. Origozo et D. Stern, ces données sont souvent regroupées en une base qui colligent et recombinent les données d'autres recherches. C'est pour cela que ces prédictions issues des *Big Data* emploient souvent des *métadonnées*, c'est-à-dire des données portant sur les expériences, enquêtes ou simulation qui ont permis de collecter les données considérées⁶⁰.

Ainsi, les données des *Big Data* ne sont pas « *big* » uniquement parce qu'elles sont nombreuses. Elles le sont aussi et surtout en *diversité*, puisqu'elles regroupent non seulement des données empiriques venant de nombreuses disciplines mais aussi des données provenant des simulations et les résultats d'autres recherches effectuées parfois dans des domaines très différents⁶¹.

De plus, les données regroupées en bases ne sont pas, comme c'est le cas souvent dans des travaux expérimentaux, collectées en vue de tester *une* loi ou *un* modèle, c'est-à-dire dans l'optique d'une seule et unique recherche. Le plus souvent les bases de données regroupent le plus d'informations possibles, mêlant des informations dont l'importance varie selon les questions que l'on pose à cette base. Autrement dit, le tri entre données pertinentes et non pertinentes s'effectue autant que faire se peut *après* leur collection, tandis que dans de nombreuses recherches qui ne s'appuient pas sur ce type de bases de données il s'effectue en grande partie *avant*⁶².

Ces spécificités des *Big Data* ont plusieurs conséquences sur les recherches à visée prédictive qui emploient les données massives numérisées :

⁶⁰Clifford LYNCH, "Big data : How do your data grow?", *Nature* 455.7209 (2008), p. 28–29, p. 28.

⁶¹Je remercie Émilien Schultz d'avoir attiré mon attention sur ces différents points.

⁶²Comme le note Eve McCulloch, biologiste à l'American Institute of Biological Sciences, « plutôt que d'analyser des données afin de répondre à une question particulière l'exploration de données (*data mining*) créative peut permettre d'inspirer de nouvelles questions — ouvrant la porte aussi bien à l'activité scientifique générant des hypothèses qu'à celle dirigée par des hypothèses » MCCULLOCH, "Harnessing the Power of Big Data in Biological Research", p. 715.

- Il est nécessaire d'utiliser des moyens de calcul algorithmique et donc des outils informatiques pour rechercher parmi ces données les informations pertinentes et les synthétiser.
- Comme le fait remarquer Serge Abiteboul, si les algorithmes de tri des données sont informatisés, ils sont bien souvent trop longs à exécuter⁶³, ce qui rend nécessaire non seulement la mise en parallèle de nombreux ordinateurs mais aussi l'utilisation d'outils statistiques pour filtrer ces données (comme l'algorithme PageRank de Google qui fonctionne en attribuant une popularité à chaque page internet à partir de la probabilité qu'a un surfeur aléatoire d'y aboutir⁶⁴). Pour extraire des informations de ces grandes bases de données, on voit donc apparaître des outils statistiques spécifiquement développés dans l'optique d'analyser des données nombreuses et variées en des temps restreints⁶⁵.
- Une partie de la procédure de formulation et de test des hypothèses sur ces données est ainsi automatisée, grâce à des logiciels permettant d'ajuster des modèles aux données, une fois les données pertinentes isolées.

Les prédictions à partir de données massives ont ainsi permis d'augmenter la capacité prédictive de nombreux domaines et théories, mais posent aussi des problèmes méthodologiques et philosophiques nouveaux et spécifiques.

⁶³Les algorithmes utilisés pour partitionner un ensemble de n données ont une longueur de l'ordre de n^3 (Anthony HEY, Stewart TANSLEY et Kristin TOLLE, eds., *The Fourth paradigm : data-intensive scientific discovery*, Redmond, Microsoft Research, 2009, p. xxiii).

⁶⁴Serge ABITEBOUL, "Sciences des données : de la logique du premier ordre à la Toile, Leçon inaugurale au Collège de France prononcée le 8 mars 2012" (2012), p. 21.

⁶⁵C'est ainsi qu'ont été développées depuis cinq ans les méthodes ABC (*Approximate Bayesian Computation*) destinées à tester des hypothèses sur des bases de données ayant les caractéristiques des *Big Data*. Voir Mark BEAUMONT et al., "Adaptive approximate Bayesian computation", *Biometrika* 96.4 (2009), p. 983–990.

2.3.2 Les prédictions à partir de données massives et leurs enjeux épistémologiques

Un des usages les plus frappants des *Big Data* est d'avoir permis de mener des recherches à fins prédictives dans des domaines où cela paraissait quasiment impossible à moins de croiser de très nombreux facteurs, comme l'écologie, la géologie, la biologie et la médecine. Les premières institutions à avoir proposé des moyens de conserver et de partager de très nombreuses données appartiennent ainsi à ces domaines ⁶⁶.

Cependant les *Big Data* apparaissent aussi dans des disciplines où des prédictions guidées par des lois sont disponibles depuis longtemps. Parmi les exemples récurrents de telles recherches, on trouve celles menées au LHC en physique des particules et les grands relevés astronomiques, comme le Sloan Digital Sky Survey ou le catalogue dressé par le satellite Gaïa. Mais, même si ces projets attirent beaucoup d'attention du fait de leur taille, il ne faut pas oublier que la plupart des recherches dans toutes les disciplines sont menées par des petites équipes (moins d'une dizaine de personnes) qui, elles aussi, comme on l'a montré avec les recherches de V. Orgogozo et D. Stern, utilisent et mettent au point des bases de données en recomposant les données provenant de bases déjà existantes.

Ainsi les *Big Data* n'ont pas seulement permis d'étendre le domaine des phénomènes prévisibles, elles ont aussi et surtout transformé la manière dont on réalise des prédictions dans de nombreuses disciplines scientifiques. Utiliser de larges bases de données permet de se passer de lois qui énoncent les facteurs pertinents à prendre en compte : une fois numérisées, les données peuvent être soumises à des traitements permettant d'extraire les facteurs similaires d'un cas à l'autre et leurs poids relatifs dans l'occurrence d'un phénomène.

Ces prédictions résultent donc d'inférences *inductives*, différentes cependant de celles étudiées par Hempel. Celles-ci sont des inductions à partir de lois statistiques indiquant les conditions sous lesquelles un évé-

⁶⁶Aux États-Unis par exemple, le National Center for Atmospheric Research et le National Ecological Observatory Network regroupent les données et les modèles numériques des chercheurs en sciences de la Terre, la *GenBank* regroupe les séquences de nucléotides identifiées et le portail internet PubMed archive toutes les études financées par le National Institute of Health est aujourd'hui en libre accès.

nement ou une propriété a une forte probabilité d'être observé. Dans le cas des prédictions à partir de *Big Data*, on peut être amené à identifier de faibles corrélations entre événements ou propriétés. En effet, l'objectif n'est pas de mettre au point ou de tester une ou plusieurs lois gouvernant le comportement d'un système, mais de rendre compte de la plupart de ses détails et de ses facteurs.

Telle est la principale caractéristique des prédictions guidées par des données dans le cadre des *Big Data* : elles tendent à être *exhaustives* dans leur dénombrement des facteurs et donc d'être les plus *complètes* possibles. En ce sens, elles maximisent la précision des prédictions et minimisent l'utilisation d'hypothèses auxiliaires sur les conditions aux limites, en intégrant tous les détails possibles d'un phénomène.

La deuxième caractéristique de ces prédictions est donc leur *complexité* : traiter une pléthore de variables différentes requiert des systèmes d'équations ou des algorithmes dans lesquels apparaissent de nombreux paramètres. Dans l'immense majorité des cas, ces systèmes d'équations sont impossibles à résoudre analytiquement et encore moins « à la main », c'est-à-dire sans outils informatiques.

Par exemple, le développement de modèles à complexité réduite qui en géomorphologie s'est fait en grande partie en réaction à des modèles dits de simulation qui s'appuient sur des données massives. Ces modèles sont donc conçus comme prédictifs mais non comme explicatifs. Comme le souligne Gilles Dowek :

Lorsqu'une théorie s'exprime par des énoncés ou des algorithmes qui font des centaines de pages, le lien entre prévision et explication se distend. Ainsi, nous avons pris l'habitude d'accepter que les prévisions météorologiques indiquent le temps du lendemain avec une probabilité de succès assez élevée, mais qu'elles ne nous expliquent pas pour quelles raisons ce lendemain sera ensoleillé ou pluvieux. [...] Si nous ne pouvons pas expliquer le temps du lendemain, c'est précisément parce que la situation météorologique n'est pas le résultat d'une cause unique, mais de milliers de causes particulières desquelles il est difficile de faire émerger une explication

globale⁶⁷.

G. Dowek relève donc ici le fait qu'une explication demande une certaine forme de simplicité, et que les prédictions à partir des *Big Data* ne sont donc pas explicatives à cause de leur complexité.

Enfin, la dernière caractéristique des prédictions fondées sur les *Big Data* est que, comme toutes les prédictions guidées par des données, elles s'appliquent aux mêmes types de données que celles qui ont été utilisées pour les formuler. Autrement dit, même si les prédictions tirées des *Big Data* portent sur de très grandes populations et parfois sur des échelles de temps et d'espace très grandes, ce sont des *interpolations*. À l'inverse, les prédictions qui sont des extrapolations requièrent plus de simplicité : elles sont réalisées sur la base de lois ou de modèles simples et robustes.

Ainsi, les prédictions à partir des *Big Data* ont donné un rôle aux prédictions guidées par des données qui va bien au-delà de ce à quoi elles étaient utilisées auparavant : compléter des bases de données par interpolation (voir chapitre 1, section 1.3.2). Mais elles confrontent les scientifiques à un certain nombre de problèmes méthodologiques⁶⁸, dont l'un a une importance philosophique particulière : l'augmentation de la complexité des hypothèses et des modèles fondés sur ces données comporte des risques comme celui de sur-ajustement.

Le sur-ajustement d'une hypothèse consiste à utiliser des équations ayant de nombreux paramètres libres pour maximiser son adéquation aux données. Cela a pour conséquence que l'on obtient des équations complexes qui ne décrivent pas le phénomène que l'on cherche à prédire, mais qui reflètent le « bruit » des données, c'est-à-dire leur fluctuation résultant de petites causes indépendantes les unes des autres (voir chapitre 7, section 7.2.3). Ainsi, les équations les plus complexes et les mieux ajustées aux données disponibles ne peuvent réaliser des extrapolations précises, parce que si on les compare à de nouveaux échantillons de données, elles reflètent l'idiosyncrasie de l'échantillon sur lequel elles ont été calibrées et non l'ensemble de la population.

⁶⁷Gilles DOWEK, "L'Explosion mémorielle change la donne", *Pour la science* 433 (2013), p. 27–31, p. 29.

⁶⁸Ceux-ci sont exposés dans le projet du défi CNRS MASTODONS démarré en 2012 : <http://www.cnrs.fr/mi/spip.php?article53>

Or, les prédictions à partir des *Big Data* étant formulées et testées par des outils statistiques et automatisées (par exemple des logiciels d'apprentissage qui ajoutent et ajustent des paramètres à partir d'échantillons de données), elles sont sur-ajustées. C'est pourquoi elles sont restreintes à des interpolations et qu'il est risqué de les utiliser pour des extrapolations.

Ce problème méthodologique mène à deux enjeux philosophiques importants.

Le *premier enjeu* est de savoir si l'on peut encore dire qu'une « théorie » intervient dans les prédictions dirigées par des données massives. G. Dowek n'hésite pas à parler de théorie pour désigner des programmes de prédictions météorologiques, même s'ils sont tellement longs et complexes qu'ils ne peuvent être compris ou manipulés par un esprit humain sans l'aide d'outils informatiques. Mais si ces programmes ne sont applicables qu'à un certain type de systèmes et qu'ils ne peuvent réaliser d'extrapolations, alors ils sont restreints à un domaine particulier d'application. Or il semble que pour pouvoir parler de théorie, quelle que soit la conception que l'on s'en fait, il faut être capable de distinguer entre un ensemble d'énoncés et de connaissances couvrant un grand nombre de cas et leur application à l'un de ces cas particuliers. Il ne va donc pas de soi que les prédictions tirées des *Big Data* soient encore des prédictions qui permettent de construire, tester ou appliquer des théories scientifiques.

Ainsi, le journaliste scientifique Chris Anderson en est venu à soutenir que « tous les modèles sont faux, mais on en a de moins en moins besoin ». Cela l'amène à décrire un état de la science future dans laquelle ni modèle, ni théorie, ni hypothèse, ne sera développé : seuls les corrélations statistiques permettront d'édifier la connaissance scientifique :

La récente mise à disposition d'immenses quantités de données et les outils statistiques qui permettent de traiter ces nombres offrent une toute nouvelle manière de comprendre le monde. Les corrélations remplacent les liens de cause à effet et la science peut progresser sans même faire appel à des modèles cohérents, des théories unifiées, ou même des expli-

cations statistiques⁶⁹.

Cependant, rien ne dit que certaines des corrélations que mentionne C. Anderson ne seront jamais considérées comme des lois scientifiques intégrées à des théories scientifiques si elles ne se révèlent incapables d'être extrapolées. De plus, il semble clair que même si les raisonnements prédictifs fondés sur l'utilisation intensive de données massives n'emploient pas *une* théorie, ils font pourtant appel à des *collections* de théories et d'éléments théoriques pour traiter la diversité des données qu'ils utilisent. Un modèle de simulation de rivière en géomorphologie peut ainsi utiliser la mécanique des fluides pour estimer le coefficient de friction des alluvions, des lois géologiques pour estimer la vitesse de sédimentation, des résultats en botanique pour estimer le taux de développement des algues, etc. Le problème reste ouvert mais l'apparente absence de théorie dans les raisonnements prédictifs guidés par des données massives est peut donc être imputable à une utilisation de nombreuses théories d'origines disciplinaires différentes plutôt qu'à une réelle disparition de l'utilisation des théories scientifiques de l'activité prédictive.

Le *second enjeu* épistémologique des prédictions tirées des *Big Data* est celui de la tension entre *complexité* et *étendue* des prédictions scientifiques. Comme on l'a vu, les prédictions guidées par des données sont souvent restreintes à des cas d'interpolation et ne peuvent être étendues sur de grandes échelles de temps et d'espace. Certains géomorphologistes comme P. Wilcock et R. Iverson réservent même l'appellation « grande échelle » aux prédictions dans lesquelles on ne peut définir tous les facteurs qui interviennent dans le comportement d'un système⁷⁰.

Cette manière de distinguer différents types de prédiction indique que lorsque l'on réalise une prédiction, on est amené à choisir un modèle de raisonnement prédictif en faisant un compromis entre l'étendue prédictive — c'est-à-dire le nombre et la variété de phénomènes que l'on peut prédire

⁶⁹Chris ANDERSON, "The End of Theory", *Wired magazine* 16 (2008), p. 108–109, p. 109.

⁷⁰« Les prédictions à grande échelle sont celles pour lesquelles des conditions contingentes ou émergentes sont spécifiées explicitement dans la prédiction, que ce soit sous la forme de conditions initiales, aux limites ou comme une règle gouvernant la morphologie » WILCOCK et IVERSON, "Prediction in geomorphology", p. 5.

– et la précision prédictive — c’est-à-dire le nombre et la variété de détails que l’on peut prédire concernant un phénomène. En effet que la meilleure manière d’augmenter la précision d’une prédiction soit de sacrifier la simplicité de l’hypothèse prédictive, ce qui rend difficile ensuite d’extrapoler le résultat de cette prédiction à d’autres phénomènes⁷¹. C’est pourquoi la science des *Big Data* peut apparaître comme prédictive et non explicative : elle sacrifie souvent la simplicité à la précision, or la simplicité semble être un élément déterminant pour qu’un esprit humain considère un raisonnement comme une explication⁷².

Ainsi, sans nier la spécificité des recherches qui s’appuient sur les données massives, il me semble exagéré de voir dans les *Big Data* le point de départ d’un nouveau paradigme scientifique⁷³, c’est-à-dire d’une nouvelle méthode scientifique qui aurait pour vocation de remplacer les méthodes existantes. En ce qui concerne les prédictions scientifiques, il apparaît que les *Big Data* ont permis de donner une importance nouvelle aux prédictions dirigées par des données, en leur accordant, dans certains domaines, le rôle qui était dévolu dans d’autres disciplines aux prédictions dirigées par des lois ou par des modèles : participer au développement et à l’application de nouvelles hypothèses.

Cependant, les prédictions guidées par des données préexistaient aux *Big Data*. De plus, elles se trouvent, sous de nombreux aspects, à l’extrémité d’un spectre de raisonnements prédictifs dont l’autre extrémité est occupée par les prédictions dirigées par des lois. Ce spectre va des prédictions complètes, complexes et à visée d’interpolation, à des prédictions incomplètes (c’est-à-dire accompagnées d’hypothèses auxiliaires, d’idéalisations et de simplifications), simples et visant des extrapolations. Le choix d’un raisonnement prédictif plutôt qu’un autre dépend en grande partie des buts que les scientifiques donnent à leurs recherches, et il n’est pas question ici de juger la valeur de ces buts. Il semble cependant fort peu probable qu’une de ces formes de raisonnement prédictif remplace

⁷¹Ces rapports entre différentes vertus épistémiques comme l’étendue et la précision d’une hypothèse sont étudiés en détail dans le chapitre 7, section 7.4.

⁷²Cf. DOWEK, “L’Explosion mémorielle change la donne”.

⁷³C’est ce que soutiennent notamment HEY, TANSLEY et TOLLE, *The Fourth paradigm : data-intensive scientific discovery*.

les autres comme unique méthode scientifique légitime, puisqu'une l'analyse que nous avons proposée montre qu'elles sont plus complémentaires qu'en compétition. Il paraît donc encore moins probable que « le déluge de données rende la méthode scientifique obsolète »⁷⁴ comme le prétend C. Anderson.

2.4 Conclusion du chapitre

Nous avons vu que la conception classique des raisonnements prédictifs, celle des prédictions guidées par des lois, n'était ni la seule logiquement possible, ni la seule à être effectivement employée par les scientifiques. Notamment dans les sciences naturelles historiques qui confrontent les chercheurs à des systèmes ouverts, la structure des raisonnements prédictifs s'appuie plus souvent sur des modèles et des bases de données que sur des lois.

Reconnaître la diversité de structures des raisonnements prédictifs permet de prouver que ces disciplines ne sont pas dépourvues de pouvoir prédictif. Cela permet aussi de constater que les moyens et les méthodes utilisés pour réaliser des prédictions changent selon les époques, notamment sous l'impulsion de nouvelles technologies informatiques et statistiques comme le montre le développement des prédictions à partir des *Big Data* depuis la fin des années 1990.

Le concept de prédiction est donc un concept à texture ouverte, qui ne peut être défini par un ensemble de critères nécessaires et suffisants, parce que son extension se déforme au fil du temps. On propose ainsi, dans la conclusion de cette première partie, de rendre compte de la diversité des raisonnements prédictifs en utilisant non pas un mais trois modèles logiques.

⁷⁴ANDERSON, "The End of Theory", p. 109.

Conclusion de la première partie : prédire et expliquer

Dans la première partie de cette thèse, on a isolé trois structures des raisonnements prédictifs en fonction de leur élément moteur⁷⁵ : les prédictions guidées par des lois, les prédictions guidées par des modèles et les prédictions guidées par des données. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de la structure logique de ces trois types de raisonnements prédictifs.

Certaines remarques s'imposent sur cette typologie des prédictions scientifiques.

Cette distinction de trois formes de prédictions scientifiques ne doit pas être comprise comme une distinction entre disciplines ou types de science : différents types de prédictions peuvent coexister au sein de la même discipline, et même au sein de la même recherche. Ainsi, comme l'a remarqué M. Williams, il existe certains cas, rares mais importants, de prédictions guidées par des lois en biologie de l'évolution. Ce qui change d'une discipline à l'autre, c'est la proportion de prédictions de chaque type : si les prédictions guidées par des lois sont plus fréquentes en astronomie que celles guidées par des données ou des modèles, elles le sont moins en biologie de l'évolution. Avec leur fréquence, c'est leur rôle dans l'activité scientifique qui change : si les prédictions guidées par des données ont principalement pour rôle de compléter les bases de données en astronomie, elles sont fondamentales en géomorphologie pour confirmer des modèles de simulation (voir chapitre 2, section 2.2.2). De même, l'apparition des *Big Data* a changé le rôle des prédictions guidées par des données dans de nombreuses disciplines en augmentant leur proportion dans de nombreuses pratiques scientifiques modernes.

De plus, il ne faut pas considérer ces types de prédictions comme des catégories exclusives. La prédiction de la vitesse de la chute d'un solide avec résistance de l'air étudiée dans le premier chapitre, par exemple, est une prédiction guidée par des lois, mais qui ne proviennent pas toutes de la même théorie. Sur ce point, elle ressemble à une prédiction guidée par

⁷⁵Voir chapitre 1, section 1.4.4

Type	Prédictions guidées par des lois	Prédictions guidées par des modèles	Prédictions guidées par des données
Élément moteur	Prédictions qui peuvent être intégrées dans des théories axiomatisées et hiérarchisées	Prédictions qui se fondent sur des représentations partielles de systèmes et qui peuvent faire partie d'une collection de modèles	Prédictions qui utilisent des bases de données pouvant intégrer les résultats d'autres études et de simulation
Auxiliaires	Prédictions qui emploient des hypothèses auxiliaires et des conditions aux limites	Prédictions qui emploient des hypothèses simplificatrices et des idéalizations	Prédictions qui cherchent à être exhaustives en intégrant tous les détails possibles
Cadre théorique	Prédictions qui se font au sein d'une théorie scientifique	Prédictions qui intègrent des éléments d'origines disciplinaires et théoriques différentes dans la construction du modèle	Prédictions qui intègrent des éléments d'origines disciplinaires et théoriques différentes dans la construction de la base de données

TABLE 2.1 : La structure logique des raisonnements prédictifs

un modèle, et il se peut que l'on nomme « modèle de chute » l'équation dans laquelle apparaît le coefficient de résistance de l'air, car on sous-entend que ce paramètre libre peut être fixé de différentes manières. De même, les modèles de simulation des géomorphologistes étudiés dans le deuxième chapitre permettent de réaliser des prédictions guidées par de très nombreuses données, mais elles négligent toujours certains aspects du système étudié. En ce sens, elles ressemblent aux prédictions dirigées par des modèles. Les différents types de raisonnements prédictifs que nous avons étudiés correspondent donc à des structures d'arguments idéal-typiques que l'on ne peut pas espérer retrouver telles quelles dans la réalité mais qui permettent de clarifier les problèmes philosophiques liés à l'activité prédictive des sciences empiriques.

Par exemple, c'est seulement si l'on admet l'existence de différents modèles logique de prédictions et d'explications scientifiques que la question des relations entre prédiction et explication peut être posée clairement.

Il y a en effet des cas où, n'en déplaise à René Thom⁷⁶, prédire c'est expliquer. Il semble légitime de considérer que la *prédiction* de la trajectoire d'un boulet de canon à partir des lois de la dynamique newtonienne est aussi une *explication* de cette trajectoire. Mais dans d'autres situations, un raisonnement prédictif ne semble pas constituer une explication complète et satisfaisante. On peut ainsi prédire, uniquement à partir de données statistiques, que fumer donne le cancer, mais cela ne semble pas expliquer comment et pourquoi fumer donne le cancer. C'est la découverte du mécanisme biologique qui mène du fait de fumer au développement de cellules cancéreuses qui constitue une explication adéquate dans cette situation.

Ainsi, les exigences pour qu'un argument soit considéré comme prédictif ou explicatif varient selon le cas étudié. Si le processus prédictif satisfait ces exigences, alors on retrouve la symétrie entre explication et prédiction des modèles de loi couvrante. Si ce n'est pas le cas, les prédictions ne sont pas des explications mais elles peuvent être un outil précieux pour mettre les scientifiques sur la voie de l'explication qu'ils recherchent en montrant qu'il existe une corrélation suffisamment forte

⁷⁶René THOM, *Prédire n'est pas expliquer*, Champs-Flammarion, 1999.

entre deux variables pour permettre des prédictions fiables.

Réciproquement, comme l'a montré H. Douglas, les différentes formes d'explication ont toutes pour point commun de diriger les scientifiques vers de nouvelles prédictions, parce qu'elles sont des outils cognitifs qui permettent de rassembler des données diverses et variées : « il existe un lien fort et fonctionnel entre explication et prédiction : les explications fournissent un chemin cognitif vers des prédictions, qui permettent ensuite de tester et de raffiner les explications »⁷⁷.

S'il n'existe donc pas une identité structurale entre prédiction et explication, on peut cependant considérer qu'il existe une symétrie heuristique entre les deux, puisque les prédictions peuvent aider à découvrir de nouvelles explications et réciproquement. C'est pourquoi ces pratiques scientifiques, prédire et expliquer, ont si souvent été rapprochées.

Mais si l'on prend le point de vue de cette symétrie heuristique, le problème n'est plus de hiérarchiser ces deux pratiques ou de déterminer ce que leurs structures respectives ont de commun, mais plutôt de savoir quels types de prédictions et d'explication sont compatibles. En effet, comme on l'a vu, la simplicité semble être un élément nécessaire des raisonnements explicatifs, ce qui n'est pas le cas de tous les raisonnements prédictifs (notamment ceux guidés par des données massives). C'est en étudiant les vertus épistémiques des raisonnements prédictifs comme la simplicité et la précision, en les définissant clairement et en examinant comment elles se combinent où s'opposent, que l'on pourra déterminer quelles explication peuvent potentiellement nous mener à des prédictions et réciproquement. On évitera ainsi des controverses abstraites pour savoir quelles théories ou disciplines sont explicatives ou prédictives, et l'on se concentrera sur la question pragmatique de savoir comment augmenter la capacité prédictive ou explicative de ces théories et disciplines.

Enfin, la typologie des formes de raisonnements prédictifs proposée ici permet aussi de formuler plus précisément le problème auquel les parties suivantes de cette thèse sont la réponse : *parmi les différentes propriétés que peut avoir un raisonnement prédictif, lesquelles sont nécessaires et/ou suffisantes pour qu'une prédiction représente un succès prédictif ayant un*

⁷⁷DOUGLAS, "Reintroducing prediction to explanation", p. 454.

rôle moteur dans le changement scientifique, permettant de confirmer de nouvelles hypothèses et de trier parmi les différentes théories scientifiques celles qui sont matures et dignes de foi ?

L'analyse des raisonnements prédictifs de cette première partie permet de montrer que cette question est loin d'être simple et que les réalistes ont un dilemme lorsqu'il s'agit d'y répondre. Nous reprendrons en détail ce dilemme dans le chapitre 8 (section 8.2.5), mais on peut montrer dès à présent qu'il se pose pour tout argument fondé sur les succès prédictifs.

À première vue, il ne semble pas difficile pour un succès prédictif d'être à la fois une bonne confirmation empirique d'une théorie, un facteur de changement dans l'histoire des sciences et de permettre ainsi de s'assurer de la vérité de cette théorie. Les prédictions conformes à la conception classique, c'est-à-dire guidées par des lois, semblent remplir ce cahier des charges. Cependant, ces prédictions sont de celles qui utilisent des hypothèses auxiliaires et des conditions aux limites idéalisées, voire explicitement fausses. Un tel succès prédictif ayant des prémisses fausses, comment peut-il permettre de distinguer parmi les théories celles qui sont matures et au sein des théories les connaissances qui sont vraies ?

Comme le remarque le philosophe des sciences Richard Laymon⁷⁸, appliquer à des données expérimentales des lois fondamentales comme comme les équations de champs de la théorie de la relativité générale ou l'équation de Schrödinger de la mécanique quantique requiert non seulement que les données soient traitées et analysées mais aussi que l'on utilise de nombreuses hypothèses prenant la forme d'énoncés contrefactuels dont la prémisse n'est pas réalisée, du type « si le système n'était pas perturbé, alors... » ou « si le système était sphérique, alors... » Autrement dit, réaliser une prédiction guidée par des lois demande de sacrifier le réalisme des hypothèses qui accompagnent ces lois.

Les prédictions guidées par des données, elles, sont bien plus détaillées : elles prennent en considération la plupart des facteurs et leurs interactions pour décrire le comportement d'un système. En ce sens, elles sont plus « réalistes » que les prédictions guidées par des théories, parce

⁷⁸Ronald LAYMON, "Scientific realism and the hierarchical counterfactual path from data to theory", *PSA : proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association*, 1982, p. 107–121.

qu'elles ne cherchent pas à mettre des facteurs de côté. Mais ces prédictions semblent être limitées à des cas d'interpolation et perdre de leur précision si l'on augmente leur portée. Elles ne semblent pas pouvoir permettre de confirmer des théories générales qui unifient différents domaines de l'expérience, et encore moins fournir une image scientifique de la réalité complète et cohérente.

Les réalistes sont donc pris dans un dilemme : une prédiction simple et réussie de nombreux phénomènes variés semble confirmer une théorie et la faire accepter par une communauté scientifique, parce qu'elle fournit aussi une explication unifiée de ces phénomènes. Mais les prédictions qui ont ces propriétés sont des prédictions guidées par des lois ou des modèles, prédictions qui sacrifient une partie de leur réalisme en utilisant des hypothèses auxiliaires idéalisées ou fictionnelles.

Pour trancher ce dilemme et déterminer s'il existe des prédictions permettant d'alimenter l'argument du miracle, j'étudie, dans la partie qui suit, les propriétés les succès prédictifs qui ont marqué le cours de l'histoire de la cosmologie, afin de voir lesquels ont joué un rôle dans les transformations de cette discipline et dans son accès au statut de science « mature ». J'examine ensuite, dans la troisième partie de cette thèse, si ce type de succès prédictif peut avoir valeur de preuve lors du test d'une hypothèse ou d'une théorie scientifique. Enfin, dans la dernière partie de cette thèse, j'aborde le problème de savoir si l'on peut argumenter en faveur du réalisme scientifique à partir de cette forme de succès prédictif.

Deuxième partie

Les prédictions dans l'histoire de la cosmologie moderne

Introduction de la deuxième partie

L'histoire des sciences semble être un réservoir sans fond d'exemples pour les anti-réalistes. On peut y contempler le spectacle de théories et d'hypothèses cohérentes et confirmées empiriquement qui se succèdent et se remplacent au gré de révolutions scientifiques, aussi brusques que brèves, bouleversant notre vision du monde. Pendant deux millénaires, les cieux ont été un bain d'éther dans lequel se mouvaient les orbites cristallines des Fixes et des planètes, mais il a fallu moins d'un siècle pour qu'il n'y règne plus que l'effrayant silence du vide de leurs espaces infinis.

C'est un fait historiquement constaté que les sciences de la nature évoluent en remplaçant d'anciennes théories par de nouvelles dont les hypothèses fondamentales sur la nature intime de la réalité sont souvent radicalement différentes. Et ce fait nous incline à regarder avec modestie l'état des sciences actuelles, mêmes lorsqu'elles rencontrent de grands succès prédictifs : si les hypothèses et théories du passé ont joui de nombreux succès empiriques mais ont été rejetées, pourquoi un autre destin attendrait-il les hypothèses et théories actuelles aux yeux de nos descendants ?

Cet argument fondé sur une constatation historique est connu depuis les travaux de L. Laudan dans les années 1980¹, sous le nom d'« induction pessimiste ».

Mais L. Laudan n'est pas le premier à l'avoir employé et on peut le faire remonter au moins jusqu'aux recherches philosophiques de Poincaré et de Duhem². C'est cet argument qui nous amène, dans cette partie, à examiner le rôle des prédictions et des succès prédictifs dans l'évolution des sciences.

En effet, la réponse la plus simple à l'induction pessimiste semble être de prouver que les révolutions scientifiques ne sont pas que le remplacement d'un système théorique par un autre de même valeur, mais qu'une hypothèse ou une théorie qui en renverse une autre permet de prédire plus de phénomènes. L'apparent fracàs de ces révolutions ne ferait donc que cacher la progression de la capacité prédictive des théories scientifiques.

¹LAUDAN, "A Confutation of Convergent Realism".

²Voir chapitre 8, section 8.1.

Les réalistes scientifiques n'auraient donc rien à craindre de se pencher sur l'histoire des sciences. Bien au contraire, elles auraient tout à y gagner : il leur suffirait d'exhiber ces prédictions qui bousculent le cours de l'histoire des sciences pour montrer non seulement que nous avons effectivement des raisons de croire que nos théories actuelles sont mieux confirmés ceux du passés, mais aussi qu'elles sont suffisamment matures et développées pour que l'on puisse avoir confiance en leur description de la réalité.

Cependant, cette thèse du rôle moteur des prédictions scientifiques et de la progression de la capacité prédictive des théories scientifiques, est, comme la thèse de l'induction pessimiste, une thèse empirique, qui doit être avancée preuves historiques à l'appui. C'est à l'examen de cette thèse qu'est consacrée cette partie.

Pour mener à bien cet examen, il faut tenir compte du problème posé à la fin de la partie précédente : il n'existe pas qu'un seul type de prédiction scientifique et la première étape de l'analyse des succès prédictifs est de déterminer lequel (ou lesquels) de ces types de prédiction est si impressionnants qu'il influence les communautés scientifiques et les pousse à adopter ou à rejeter des hypothèses et des théories.

Cette remarque a une conséquence méthodologique importante : il ne suffit pas, comme le font la plupart des analyses philosophiques des succès prédictifs, d'étudier des cas isolés de prédictions, des épisodes décontextualisés de l'histoire des sciences, détachés des programmes de recherche dont ils font partie et des enjeux scientifiques de leur époque. Les études de cas particuliers de prédictions ont de nombreux avantages et on y recourt à de nombreuses reprises dans cette thèse, mais elles comportent un biais systématique : elles sont aveugles aux connexions qui lient une prédiction à d'autres qu'elle remplace, annonce ou rend possibles.

C'est pour cela que cette partie consacrée au rôle des prédictions dans l'évolution historique des connaissances scientifiques ne consiste pas en une série d'études de cas particuliers telle qu'on peut en trouver dans l'ouvrage de S. Psillos par exemple³. Au contraire, le choix qui a été fait ici consiste à étudier le développement d'une discipline, de ses origines

³PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, chapitre 5 et 6.

à nos jours, et de voir quels types de prédictions ont été impliqués dans l'accession de cette discipline au rang de science et dans les révolutions scientifiques qui l'ont par la suite transformée.

Une science dont l'histoire s'étend sur plusieurs siècles ou millénaires comme l'astronomie ou la chimie ne peut convenir à un tel projet dans le cadre de cette thèse. C'est donc une science jeune, apparue il y a à peine un siècle, qui est étudiée dans les chapitres suivants : la cosmologie physique, dont tous les spécialistes datent la naissance dans le premier quart du XX^e siècle.

Le choix de la cosmologie physique comme objet d'étude a un autre intérêt : si d'une part cette discipline est une branche de l'astronomie, souvent décrite comme étant la science prédictive par excellence, elle est, d'autre part, une science apparemment non expérimentale. Non seulement on ne peut manipuler l'Univers en laboratoire, mais en plus on ne dispose que d'un seul exemplaire d'Univers observable. En vertu de ce statut particulier, cette discipline a été et est toujours le lieu de nombreux débats sur les notions de testabilité et de capacité prédictive. La notion de prédiction a ainsi été théorisée par les cosmologistes eux-mêmes, dont certains soutiennent qu'il faudrait changer aujourd'hui de méthode prédictive pour l'adapter à de nouveaux domaines de recherche⁴.

Enfin, la cosmologie a la spécificité d'être à la fois une science *phénoménologique*, qui vise à rendre compte de données d'observation, et une science *pluraliste*, qui fait intervenir de nombreuses autres disciplines, comme la relativité générale, la physique des particules, la mécanique quantique, l'astrophysique ou la thermodynamique. C'est donc une discipline privilégiée pour voir à l'œuvre les différents types de prédictions qui permettent aux scientifiques de parcourir la route, souvent accidentée, allant de la théorie aux données en passant par des modèles idéalisés.

Il s'agit donc, dans les chapitres qui suivent, d'adresser à la cosmologie les questions suivantes :

- Les prédictions ont-elles joué un rôle dans la constitution de la

⁴Voir notamment Vitaly VANCHURIN, Alexander VILENKIN et Serge WINITZKI, "Predictability crisis in inflationary cosmology and its resolution", *Physical Review D* 61.8 (2000).

cosmologie en science « mature » ? Si oui, de quel type de prédiction s'agit-il ? Ces questions sont traitées dans le chapitre 3 qui montre comment la cosmologie est progressivement devenue un domaine de recherche reconnu comme scientifique par les communautés des astronomes, des mathématiciens des physiciens.

- Une fois la cosmologie considérée comme une science mature, quel rôle ont joué les prédictions dans les révolutions scientifiques qu'a connues cette discipline ? Ce sont les enjeux des chapitres 4 et 5 qui étudient comment les cosmologistes ont évalué et accepté deux nouvelles théories au cours de la deuxième partie du XX^e siècle : la théorie du big bang et celle de l'inflation.

La conclusion de cette partie est consacrée à un résumé des acquis de cette histoire des prédictions en cosmologie, afin de caractériser les principaux traits des prédictions qui ont joué un rôle, sur le long terme, dans l'évolution des connaissances théoriques et expérimentales de cette discipline.

Chapitre 3

Le rôle des prédictions dans la formation de la cosmologie scientifique de 1917 à 1939

Le philosophe et historien de la cosmologie Jacques Merleau-Ponty a défini la cosmologie comme la branche de la physique qui a pour objet d'étude la *totalité* des phénomènes naturels, c'est-à-dire non pas tout ce qui existe, mais la structure, qui a pour nom *Univers*, dans laquelle prend place l'ensemble de ces phénomènes physiques¹.

Ainsi définie, la cosmologie est une science aussi ancienne que l'astronomie. On trouve dès le IV^e siècle avant Jésus-Christ une « cosmologie qui est scientifique au sens le plus moderne du mot parce que la théorie, les observations, la mathématique s'y accordent de façon tout à fait remarquable »². Cependant, cette discipline disparaît lors de la révolution copernicienne en même temps que le *cosmos* clos, harmonieux et circulaire que les astronomes de l'antiquité s'étaient donnés pour objet. Malgré son intérêt historique et philosophique évident, la cosmologie antique n'est pas étudiée dans le cadre de cette thèse parce que ses prédictions n'ont eu que très peu d'influence sur la conception de l'Univers développée par la cosmologie moderne.

¹Jacques MERLEAU-PONTY, *Sur la science cosmologique : conditions de possibilité et problèmes philosophiques*, Paris, EDP Sciences, 2003, p. 189.

²MERLEAU-PONTY, *Sur la science cosmologique : conditions de possibilité et problèmes philosophiques*, p. 40.

On considère souvent que la cosmologie moderne est née au début du XX^e siècle, en 1917 précisément, lorsqu’Albert Einstein publie la première solution cosmologique aux équations de la relativité générale auxquelles il a abouti deux ans plus tôt³. Cette solution est dite « cosmologique » parce qu’elle prend en compte l’ensemble de la matière de l’Univers et décrit donc la géométrie de l’espace-temps dans son ensemble (ce qui correspond à la définition de la cosmologie comme science de la *totalité* des phénomènes). Moins de six semaines plus tard, l’astrophysicien néerlandais Willem de Sitter (1872-1934) propose un modèle d’Univers concurrent⁴ qui est aussi une solution des équations de la relativité générale. Les qualités et défauts respectifs de ces deux modèles, appelés « modèle A » et « modèle B » à la suite de de Sitter, sont à l’origine de la première controverse moderne sur la nature et la forme de l’Univers, controverse qui se poursuit pendant plus d’une décennie.

Les historiens de la cosmologie s’accordent ainsi à décrire cette controverse comme « une véritable transformation non moindre que celle qui au début du XVII^e siècle a transformé l’Univers ptoléméen en Univers galiléen »⁵, comme « une révolution de la conception ancestrale de l’Univers »⁶ ou encore comme « la date de conception [de la cosmologie] »⁷. Ainsi, entre 1917 et 1939, la cosmologie serait passée d’un champ de débats et de questionnements à la lisière entre science et métaphysique, à une discipline mature reconnue comme telle par les scientifiques de l’époque.

Pourtant, cette même période est aussi considérée par les historiens

³Albert EINSTEIN, “Kosmologische Betrachtungen Zur Allgemeinen Relativitätstheorie”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (1917), p. 142–152. On utilise ici la traduction française suivante : Albert EINSTEIN, “Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale”, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Paris, Seuil, 1993, p. 88–98.

⁴Willem DE SITTER, “On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein’s latest hypothesis”, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings* 19 (1917), p. 1217–1225.

⁵Jacques MERLEAU-PONTY, *Cosmologie du XXe siècle : étude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965.

⁶Helge KRAGH, *Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton, Princeton University Press, 1996, p. 12.

⁷John NORTH, “The Early years”, *Modern cosmology in retrospect*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 11–30, p. 11.

comme l'ère de la « géométrie cosmologique »⁸ ou comme la période de « la petite industrie mathématique de la cosmologie »⁹. En effet, cette controverse initiée par Einstein et de Sitter impliqua des astronomes et des physiciens qui ne cherchaient qu'à développer des modèles d'Univers mathématiquement cohérents mais sans prédire de résultats expérimentaux qui auraient pu être observés avec les moyens astronomiques de l'époque. La situation n'aurait changé qu'en 1929, lorsque Hubble publia sa découverte de la relation qui porte aujourd'hui son nom, entre la distance des galaxies et leur décalage spectral. Cette relation est souvent considérée comme étant à l'origine de la découverte de l'expansion de l'Univers qui donna naissance aux modèles dynamiques d'Univers¹⁰.

Si l'on prête crédit à ce récit sur la naissance de la cosmologie, aucune prédiction en rapport avec des données observables n'aurait participé à la formation de cette science. Les seules prédictions dont on pourrait trouver des traces dans la controverse entre le modèle d'Einstein et celui de de Sitter seraient des prédictions purement *théoriques*, fixant la valeur de paramètres non mesurables à l'époque, comme le rayon ou la courbure de l'Univers. De telles prédictions ne pouvant être testées à l'époque, elles ne pouvaient rencontrer de succès empirique. On pourrait donc croire que la cosmologie physique est née sans l'aide d'aucun succès prédictif.

Dans ce chapitre je montre que contrairement à l'image que l'on donne souvent de la naissance de la cosmologie moderne, les premiers modèles d'Univers relativistes ont mené à des prédictions qui ont joué un rôle décisif dans la formation de cette science et je donne une caractérisation de ces prédictions.

⁸NORTH, "The Early years", p. 12.

⁹KRAGH, *Cosmology and Controversy*, p. 12.

¹⁰L'idée selon laquelle ce serait Hubble qui a découvert l'expansion de l'Univers est l'une des erreurs les plus communément répandues sur l'histoire de la cosmologie. On la trouve pourtant dans des ouvrages de référence comme celui de Alan LIGHTMAN et Roberta BRAWER, *Origins : The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard, Harvard University Press, 1990, p. 5. Comme je le montre dans la dernière section du chapitre, cette erreur a d'importantes conséquences sur la manière dont on conçoit la naissance de la cosmologie physique.

3.1 1917-1929 : la petite industrie mathématique des premiers modèles cosmologiques

3.1.1 Les considérations cosmologiques d'Albert Einstein

L'article d'Einstein de 1917, considéré par certains historiens comme l'« acte de naissance » de la cosmologie scientifique moderne¹¹, parcourt, de l'aveu de son auteur lui-même, un chemin « indirect et cahotant »¹² parfois difficile à suivre.

Comme l'a montré Pierre Kerszberg dans son ouvrage consacré à la controverse entre Einstein et de Sitter¹³, l'écriture de cet article a été provoquée par le débat entre ces deux savants, qui eut lieu au cœur de la Première Guerre mondiale (les échanges entre les deux se faisant souvent au dos de cartes postales qui étaient les seuls courriers pouvant traverser les zones en conflit) et qui avait pour objectif de faire connaître les théories d'Einstein en dehors du monde germanophone.

Cette controverse porte en grande partie sur la relativité de l'inertie et ce que Einstein appelle le « principe de Mach ». Selon ce principe, auquel adhéra Einstein au moins jusqu'aux années 1930, un corps ne peut être doté d'inertie que relativement à d'autres corps. Autrement dit, un corps isolé n'a pas d'inertie : celle-ci est déterminée par les masses lointaines.

Or les premières solutions aux équations de champs de la relativité générale, comme celle proposée par Karl Schwarzschild en 1916¹⁴, supposaient un corps isolé (comme le Soleil) dont le champ gravitationnel tend vers zéro à l'infini. Mais s'il tend vers zéro à l'infini, c'est qu'il n'y a

¹¹NORTH, "The Early years", p. 11.

¹²EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 91.

¹³Pierre KERSZBERG, *The invented universe : the Einstein-De Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology*, New York, Clarendon Press, 1989, chapitre 2.

¹⁴Karl SCHWARZSCHILD « Über das Gravitationsfeld eines Massepunktes nach der Einsteinschen Theorie », *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte* (1916), p. 189-196.

aucune masse présente à l'infini. Ce corps aurait donc une inertie *absolue*, relativement à aucune autre masse, ce qui va à l'encontre du principe de Mach.

Ainsi, pour Einstein, ce type de solution des équations de la relativité générale n'était qu'une *idéalisaton* qui va à l'encontre d'un principe fondamental qu'il avait essayé d'implémenter dans sa théorie de la relativité. Une telle idéalisation n'était admissible pour lui que dans le cas où l'on applique les équations de la relativité générale à des problèmes concernant le système solaire, très éloigné des masses distantes que l'on peut négliger dans les conditions aux limites de ces problèmes. Mais Einstein fait remarquer qu'« il n'est nullement évident *a priori* que l'on ait le droit d'imposer ces mêmes conditions aux limites lorsque l'on considère des parties plus vastes de l'Univers matériel »¹⁵ puisque de telles conditions aux limites ne peuvent être justifiées lorsque l'on prend en compte les masses de *tous* les corps pour déterminer la structure de l'espace-temps global.

Ainsi, pour Einstein, la solution de Schwarzschild n'était qu'une simplification mathématique n'ayant pas réellement de sens physique¹⁶. Ses considérations cosmologiques de 1917 sont une tentative pour trouver une solution aux équations de la relativité générale qui ne suppose pas de telles conditions aux limites entrant en contradiction avec le principe de Mach.

Le seul fait astronomique sur lequel s'appuie Einstein dans sa tentative est le suivant : les vitesses des étoiles sont petites par rapport à la vitesse de la lumière. Or, la plupart des astronomes du début du XX^e siècle considèrent que l'Univers n'est constitué que de *notre* galaxie, c'est-à-dire d'un regroupement fini d'étoiles observables au télescope¹⁷. Puisque les

¹⁵EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 89.

¹⁶Ce qui ne l'avait pas empêché de l'utiliser pour calculer en 1916 l'avancée du périhélie de Mercure et prouver la supériorité de sa théorie sur celle de Newton. Comme on l'a vu dans le premier chapitre de cette thèse (section 1.4), les scientifiques utilisent fréquemment des conditions aux limites idéalisées ou en contradiction avec d'autres principes théoriques si cela leur permet de réaliser de nouvelles prédictions.

¹⁷Le fait que certaines nébuleuses soient des objets extra-galactiques, c'est-à-dire des galaxies comme la notre, ne fut prouvé qu'entre 1924 et 1926, lorsque Hubble put mesurer la distance des galaxies NGC6822, M33 et M31.

vitesse des étoiles dépendent du champ gravitationnel dans lequel elles se trouvent et que ces vitesses sont comparables à celles des objets dans notre propre système solaire, cela laisse supposer que le champ gravitationnel de *tout* l'univers est homogène et « ne peut être beaucoup plus grand que là où nous nous trouvons »¹⁸.

Ce fait mène à un problème déjà rencontré par la théorie de la gravitation de Newton : le potentiel gravitationnel de l'Univers a des conditions aux limites telles qu'il est possible, pour toute particule, d'acquérir une énergie suffisante pour pouvoir s'en échapper. En effet, si le champ gravitationnel est partout d'une intensité équivalente à celui qui règne dans notre système solaire, il n'est pas suffisamment puissant pour empêcher que ces objets acquièrent la vitesse nécessaire pour s'en libérer. Si les corps et le rayonnement peuvent s'échapper du champ gravitationnel de notre galaxie, pourquoi celle-ci ne s'est-elle pas complètement dépeuplée ?

Einstein a donc pour objectif de résoudre deux problèmes liés aux conditions aux limites de l'Univers : qu'elles respectent le principe de Mach d'une part, qu'elles résolvent le problème du dépeuplement d'autre part. Pour cela, il fait trois hypothèses sur la structure de l'Univers¹⁹ :

Hypothèse d'homogénéité : « Si seule nous intéresse la structure à grande échelle, nous pouvons nous représenter la matière comme uniformément distribuée sur un espace immense »²⁰.

Hypothèse de stabilité : Les vitesses des étoiles étant petites par rapport à la vitesse de la lumière, « la matière peut être considérée comme étant au repos de manière permanente »²¹.

Hypothèse de clôture : des deux hypothèses précédentes et du principe fondamental de la relativité générale selon lequel la géométrie de l'espace-temps d'un système est déterminée par son contenu en matière et en énergie, on

¹⁸EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 93.

¹⁹EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 94.

²⁰EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 94.

²¹EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 94.

peut déduire que l'Univers doit avoir une courbure *constante* dans le temps et dans l'espace, courbure qui est *positive*²². Cela signifie que l'Univers est un espace sphérique — fini et clos sans avoir pour autant de limite ni de centre — de rayon R constant dans le temps — ce qui signifie que cet Univers est statique et éternel²³.

Dans un tel Univers homogène, statique et clos, ni corps ni rayonnement ne peut s'échapper, puisque l'Univers est fini et l'inertie de toute masse est relative aux autres masses. Einstein a donc bien réussi à trouver un modèle d'Univers qui résout le problème du dépeuplement et satisfait le principe de Mach. Mais il reste à prouver que cet Univers est une solution des équations de la relativité générale.

Or la métrique de cet Univers *n'est pas* une solution des équations de la relativité générale. Einstein s'inspire alors explicitement des travaux d'Hugo von Seeliger (1849-1924), astronome allemand qui avait suggéré en 1895 de modifier les équations de Newton pour résoudre le problème du dépeuplement de l'Univers²⁴ et il modifie ses propres équations de la relativité générale, en y ajoutant un terme dénoté λ (qui fut par la suite nommé « constante cosmologique » parce qu'il a pour effet de contrebalancer l'attraction gravitationnelle mais n'est sensible qu'à l'échelle de l'Univers tout entier).

Cette adjonction du terme λ permet à Einstein de déduire trois relations de son modèle d'Univers :

1. $\lambda = \kappa\rho/2$ (où ρ est la densité de l'Univers et κ une constante reliée à la vitesse de la lumière et à la constante universelle de la gravitation)
2. $\lambda = 1/R^2$

²²« De notre hypothèse de l'uniformité de la distribution des masses qui engendrent le champ, on déduit que la courbure de l'espace métrique recherché doit elle aussi être une constante. » EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale", p. 95.

²³C'est probablement cette structure sphérique et éternelle de l'Univers, ressemblant sous plusieurs aspects au cosmos de l'antiquité, qui incita Einstein à employer le terme « cosmologie » dans le titre de son article.

²⁴HUGO VON SEELIGER, "Über das Newton'sche Gravitationsgesetz", *Astronomische Nachrichten* 137 (1895), p. 129–136.

3. $M = \sqrt{32\pi^2/\kappa^3\rho}$ (où M est la masse de l'Univers)

Einstein semble proposer ici des *prédictions*, puisqu'il fixe la valeur de λ et de M sans les mesurer, en se basant uniquement sur des raisonnements théoriques. De plus, si R et λ n'étaient pas des grandeurs mesurables en 1917, les grandeurs κ , M et ρ , elles, pouvaient être estimées à partir d'observations astronomiques. Même si l'article d'Einstein consiste en grande partie à résoudre des problèmes théoriques et mathématiques, peut-on considérer qu'il mène pourtant à des prédictions de grandeurs observables ?

Si l'on y regarde de plus près, ces relations sont effectivement des prédictions, mais qui ne peuvent être considérées comme des succès empiriques à mettre au crédit de la théorie d'Einstein car elles ne sont pas réellement *testables*. En effet, imaginons que l'on fixe la valeur d'un paramètre X théoriquement, par exemple en utilisant la relation $X = Y$. Pour tester cette prédiction, il faut disposer d'un moyen de mesurer X *indépendamment* de Y . Sinon, en mesurant Y , on *ajuste* la valeur X aux observations mais on ne la prédit pas et il n'est pas possible de tester la relation $X = Y$. Ainsi, pour qu'une prédiction soit testable, il faut que la valeur d'un paramètre puisse être fixée indépendamment par la mesure et par la théorie ; autrement c'est une prédiction strictement *théorique* qui ne peut être testée par des expériences ou des observations.

Or c'est précisément le cas dans lequel se trouve λ dans les deux premières relations ci-dessus. Seuls les termes ρ et κ pouvaient être fixés par la mesure et l'observation à l'époque où Einstein publia son article. La relation 1 ne fait donc que définir λ par rapport à ρ et κ en donnant un moyen de l'ajuster par des observations astronomiques. Mais R est un paramètre qui ne pouvait être évalué par les astronomes avec les moyens théoriques et techniques de l'époque – ce paramètre n'avait d'ailleurs aucun sens en dehors du modèle d'Einstein. Il n'est donc pas possible d'utiliser la relation 2 pour fixer théoriquement la valeur de λ et ensuite essayer de tester cette valeur en utilisant la relation 1. Pour la même raison, il n'est pas possible non plus de fixer R grâce aux relations 1 et 2 puis d'essayer de le mesurer indépendamment.

Cependant, les relations 1 et 2 permettent de déduire la relation 3 (si

l'on suppose que le volume de l'Univers est égal à $2\pi^2 R^3$). Or la relation 3 est une égalité entre trois paramètres qui auraient pu être mesurés indépendamment les uns des autres : M , κ et ρ . La relation 3 aurait donc bien pu servir à réaliser une prédiction testable, en déterminant les valeurs de κ et de ρ par l'observation, en utilisant la relation pour prédire M , puis en observant si la valeur prédite correspond à celle mesurée par les moyens de l'observation astronomique. Si tel était le cas, on aurait alors eu affaire à une prédiction réussie qui aurait sûrement constitué un succès prédictif important du modèle d'Einstein.

Mais la masse de l'Univers ne se laisse pas facilement évaluer par l'observation astronomique, en 1917 comme aujourd'hui. En effet, tout ce qu'une observatrice peut faire (et c'est déjà loin d'être chose aisée), c'est estimer la masse de l'Univers *observable* M_{obs} , c'est-à-dire les phénomènes qui émettent un rayonnement que l'on peut recevoir sur Terre²⁵. Pour estimer M qui est la masse de l'Univers *total*, il faut extrapoler la masse de l'Univers observable à partir d'hypothèses qui dépendent du modèle d'Univers choisi. Autrement dit, pour obtenir M à partir de M_{obs} , il faut supposer que l'on se trouve dans un Univers comme celui décrit, par exemple, par Einstein. M ne peut donc réellement être mesurée indépendamment de la relation 3, ni, par conséquent, mener à une prédiction testable.

En somme, s'il est faux d'affirmer que le modèle d'Univers d'Einstein est un pur exercice de géométrie qui ne s'appuie sur aucun fait d'observation — puisqu'il prend en compte la petitesse des vitesses stellaires — et qu'il ne réalise aucune prédiction — puisqu'il permet bien de fixer la valeur de grandeurs mesurables et non-mesurables — il est vrai cependant que son succès ne vient pas de sa capacité à prédire des phénomènes nouveaux ou déjà connus.

Einstein conclut ainsi son article en affirmant que « cette conception [de l'Univers] est exempte de contradiction logique [...] ; ce n'est pas ici le lieu d'examiner si elle peut être soutenue du point de vue des connaissances astronomiques actuelles »²⁶. En effet, dans le contexte de 1917, il

²⁵On peut aussi aujourd'hui évaluer la masse de la matière noire, qui a des effets gravitationnels sur la matière observable.

²⁶EINSTEIN, "Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale",

est clairement impossible de tester les relations auxquelles aboutit Einstein à la fin de son article. Au cœur du premier conflit mondial, il n'est pas imaginable de réaliser un test empirique du modèle d'Univers d'Einstein, ou même de la théorie de la relativité générale.

Et c'est justement pour cela que Einstein a été amené à ses considérations cosmologiques. Le seul avantage de la théorie de la relativité générale sur la dynamique newtonienne ayant été établi à cette époque est une plus grande précision dans les prédictions de l'avancée du périhélie de Mercure. Les prédictions de ces théories étant équivalentes pour les phénomènes se trouvant dans un champ gravitationnel peu intense, les tests expérimentaux pouvant départager ces deux théories sont complexes et demandent des expériences coûteuses difficilement réalisables. L'idée de mesurer la déviation des rayons lumineux d'une étoile lointaine par le Soleil par exemple, à laquelle songea Einstein dès 1915, dut attendre l'expédition d'Arthur Eddington (1882-1944) en 1919, parce qu'un tel test expérimental demandait de mettre sur pied une expédition scientifique quasiment impossible à réaliser en temps de guerre.

C'est pourquoi Einstein fut naturellement amené à développer les avantages *logiques* de sa théorie par rapport à celle de Newton. En tirant partie du fait que la relativité générale ne suppose pas un espace-temps absolu mais *relationnel* dont la courbure est affectée par la masse et l'énergie des corps physiques, Einstein a pu démontrer que sa théorie — au prix d'une modification de ses équations fondamentales — ne menait pas aux mêmes contradictions que celle de Newton²⁷. Ce succès logique ne demandait ni expédition coûteuse, ni expérience de laboratoire, ni observatoire astronomique.

La première condition pour qu'une prédiction puisse représenter un succès et joue un rôle dans l'acceptation d'une nouvelle théorie est donc la suivante : il faut qu'elle puisse être testée avec des techniques d'expérience ou d'observation déjà existantes ou réalisables. Cela signifie qu'il faut qu'elle soit testable *en pratique* et pas seulement en droit : il faut que

p. 97.

²⁷Pour une analyse détaillée des contradictions de la cosmologie newtonienne, voir Peter VICKERS, "Was Newtonian cosmology really inconsistent?", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40.3 (2009), p. 197–208.

les contemporains aient les moyens de la tester ou l'espoir de trouver ces moyens dans un futur proche. D'où l'importance de prendre en compte le contexte historique et scientifique dans lequel est réalisée une prédiction, puisque c'est lui qui détermine si les scientifiques ont les moyens théoriques de la réaliser et les moyens techniques de la tester.

L'article d'Einstein illustre donc plutôt un cas de succès non prédictif, qui consiste à prouver la *cohérence* logique d'une théorie, c'est-à-dire la non-contradiction de ses hypothèses entre elles et avec d'autres principes théoriques (comme le principe de Mach). Mais si l'on attribue ce type de succès à l'article d'Einstein, il semble difficile de le considérer comme « l'acte de naissance de la cosmologie moderne », puisque les débats sur la cohérence d'une description physique de l'Univers remontent au moins à 1895, date de l'article de von Seeliger sur les problèmes de l'application de la loi de gravitation de Newton à de larges échelles. C'est dans cette tradition consistant à trouver un modèle d'Univers *cohérent* à partir des lois fondamentales de la physique que doivent être compris les premiers travaux cosmologiques d'Einstein et leur succès.

Mais il est certain que l'article d'Einstein a donné naissance à la cosmologie « relativiste », c'est-à-dire fondée sur la théorie de la relativité générale, en ayant prouvé que cette cosmologie n'était pas contradictoire. Et c'est de cette cosmologie que sont issus les premiers modèles d'Univers ayant rencontré des succès prédictifs.

3.1.2 L'Univers imaginaire de Willem de Sitter et les Univers dynamiques d'Alexandre Friedmann

Quelques semaines après l'article d'Einstein, l'astronome néerlandais de Sitter trouva une autre solution cosmologique aux équations de la relativité générale. À l'origine, il refusait d'appeler cette solution un « Univers », ou même un « modèle d'Univers »²⁸, parce que son objectif n'était pas de trouver une structure de l'Univers compatible avec les observations astronomiques, mais de montrer que le modèle d'Univers d'Einstein n'est pas l'*unique* solution des équations de la relativité générale.

²⁸Voir KERSZBERG, *The invented universe : the Einstein-De Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology*, p. 174.

On comprend ces réticences de de Sitter si l'on se penche sur l'Univers qu'il propose comme solution aux équations de la relativité générale. Cette solution suppose que toutes les composantes du tenseur matière-énergie dégénèrent vers 0 à l'infini, c'est-à-dire qu'à strictement parler son Univers est statique, éternel et *vide* : il n'a *aucune* densité — ou une densité complètement négligeable — et donc aucune matière (voir chapitre 1, section 1.4.2 et l'annexe du chapitre 3 pour une démonstration). Pourtant, avec une telle métrique et l'introduction de la constante cosmologique λ , de Sitter montra dans ses trois articles publiés sur la question en 1917²⁹ que ce modèle d'Univers aurait une courbure positive comme celui d'Einstein. Cette conclusion, qui implique que l'espace-temps puisse être déformé en l'absence de matière et donc qu'un champ gravitationnel puisse exister en l'absence de masse, allait directement à l'encontre du principe de Mach et a mis Einstein dans l'embarras.

Celui-ci répondit donc à de Sitter, par voie postale d'abord, puis en publiant des « Remarques critiques sur une solution des équations de la gravitation donnée par M. de Sitter »³⁰ dans les comptes rendus de l'Académie prussienne des sciences, que l'Univers de de Sitter était doté de « singularités ». Une singularité est un point de l'espace-temps où l'on ne peut définir un champ gravitationnel de proche en proche. Autrement dit l'Univers de de Sitter n'a pas de continuum d'espace-temps défini sur l'ensemble de sa structure. Cette contradiction prouvait, au yeux d'Einstein, qu'un Univers qui ne respecte pas le principe de Mach ne peut avoir de sens physique.

Mais Einstein s'était trompé, puisque le modèle de de Sitter ne comporte pas de singularités mais un *horizon* dépendant de l'observateur. Cette erreur révèle que lorsqu'Einstein compara son modèle à celui de de Sitter, il ne compara pas leurs prédictions observables, mais uniquement

²⁹Dans l'ordre chronologique : DE SITTER, “On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein's latest hypothesis”, Willem DE SITTER, “Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper”, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 78 (1917), p. 3–28, DE SITTER, “On the curvature of space”.

³⁰Albert EINSTEIN, “Remarques critiques sur une solution des équations de la gravitation donnée par M. de Sitter”, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Seuil, 1993, p. 100–103.

leur cohérence en tant que solution des équations de la relativité générale. C'est pour cela que la controverse cosmologique qui est née avec la publication du modèle de de Sitter est souvent décrite comme un débat sur les propriétés géométriques et la cohérence logique des modèles d'Univers et non sur leur capacité prédictive.

De même, le météorologue russe Alexandre Friedmann (1888-1925)³¹ publia un article 1922 dans le *Zeitschrift für Physik* qui explorait de nouvelles solutions aux équations de la relativité générale, mais ne chercha ni leur signification physique ni à en tirer des prédictions. Ces solutions étaient résumées simplement et élégamment dans des équations différentielles fondées sur le principe selon lequel le rayon de l'Univers, c'est-à-dire ses dimensions spatiales, n'est pas constant mais dépendant du temps. L'équation principale, qui porte aujourd'hui le nom d'équation de Friedmann-Lemaître du nom de ses deux co-découvreurs, relie le taux d'expansion d'Univers à son contenu matériel³²

$$\left(\frac{R'}{R}\right)^2 = \frac{\lambda}{3} - \frac{k}{R^2} + \frac{8\pi G\rho}{3} \quad (3.1)$$

où k est la courbure spatiale de l'Univers (qui vaut -1, 0 ou 1), G la constante universelle de gravitation, λ la constante cosmologique et R le facteur d'échelle de l'Univers (encore appelé « rayon de l'Univers » à cette époque³³, R n'est pas une constante mais une fonction du temps³⁴), R' sa dérivée par rapport au temps et donc R'/R le taux d'expansion de l'Univers.

Ainsi, dans une telle équation, l'Univers n'est pas statique mais dynamique : il connaît une expansion si $R'/R > 1$, une contraction si $R'/R < 1$. Les travaux de Friedmann sont révolutionnaires, car ils mettent en

³¹Je me plie ici à la translittération germanisée du nom de Friedmann telle qu'elle a été instituée par Einstein et reprise par la suite.

³²Pour simplifier, nous avons exprimé cette équation en unités naturelles, c'est-à-dire où c la vitesse de la lumière vaut 1. Pour une démonstration, voir l'annexe du chapitre 3.

³³On emploie plutôt aujourd'hui le terme de « facteur d'échelle » de l'Univers, plutôt que de « rayon », terme qui laisse penser que l'on se place dans un Univers sphérique (de courbure positive). Mais la notation R pour désigner ce facteur d'échelle s'est maintenue.

³⁴Alexandre FRIEDMANN, "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik* 10.1 (1922), p. 377–386.

lumière un présupposé des modèles d'Einstein et de de Sitter que leurs auteurs avaient à peine mentionné tant il leur semblait évident : l'Univers est statique, il n'évolue pas en tant que système globale parce que son rayon est une constante, seuls changent les systèmes que l'on trouve *dans* l'Univers.

Cependant, Friedmann ne tira de son analyse aucune conséquence astronomique qui permettrait de mesurer l'expansion de l'Univers ou de tester les modèles d'Univers en expansion. Comme le fait remarquer l'historien H. Kragh :

Aussi importants que fut l'analyse de Friedmann il s'agissait plus d'une analyse mathématique des solutions des équations de champ d'Einstein qu'une tentative pour formuler un modèle cosmologique de l'Univers. Il semble n'avoir eu aucun intérêt pour les conséquences physiques et astronomiques de son travail, qu'il choisit de négliger. Il n'y a aucune raison de supposer qu'il pensait que l'Univers réel était en expansion.³⁵

En effet, l'article de Friedmann de 1922 ne montre aucune volonté d'intégrer des données expérimentales. On peut considérer que les analyses de Friedmann comportent effectivement un certain nombre de prédictions *théoriques*, puisque les équations différentielles de Friedmann permettent de déterminer le taux d'expansion du facteur d'échelle de l'Univers en fonction d'autres variables : la constante cosmologique, la courbure de l'Univers et sa densité. Mais, comme dans le cas de l'article d'Einstein de 1917, ces prédictions ne sont pas testables et ne peuvent mener à aucun succès prédictif.

Ainsi, la première transformation théorique majeure de la cosmologie scientifique — le passage à des solutions dynamiques des équations de la relativité générale — semble s'être fait sans qu'aucun succès prédictif ne soit impliqué, ce qui prouverait que les prédictions ne jouent pas un rôle indispensable dans l'émergence d'une nouvelle discipline scientifique et ses évolutions théoriques.

³⁵Helge KRAGH, "Early dynamical world models : A historical review", *Proceedings of the International Astronomical Union Symposium* 260 (2009), sous la dir. de David VALLS-GABAUD et Alan BOKSENBERG, p. 182–188, p. 185.

Cependant, contre toute attente, c'est le modèle d'Univers le plus idéalisé, celui de de Sitter, qui s'est avéré être le premier à être authentiquement prédictif et à rencontrer un certain succès prédictif. En effet, ce modèle a une caractéristique surprenante qui contribua beaucoup à la réputation qu'il acquit, au cours des années 1920, auprès des mathématiciens et astronomes — aux dépens de celui d'Einstein et des solutions de Friedmann, lesquelles tombèrent presque dans l'oubli jusqu'en 1930.

3.1.3 L'effet de Sitter et les décalages spectraux vers le rouge avant 1930

Einstein avait remarqué que le modèle de de Sitter était doté de singularités. En juin 1918, le mathématicien allemand Félix Klein (1849-1925) apporta la preuve à Einstein que les singularités de ce modèle pouvaient être éliminées par un changement de coordonnées³⁶. Cela signifie que dans l'Univers de de Sitter, les singularités ne sont pas les mêmes pour tous les observateurs, mais que chaque observateur a un *horizon*, une distance au-delà de laquelle il ne pourra jamais observer d'événement. Or, la particularité du modèle de de Sitter est que pour un observateur donné, tous les objets semblent « attirés » par cet horizon et donc s'éloigner de lui, alors même que ces objets ne sont pas animés de mouvements intrinsèques.

Par conséquent, l'Univers de de Sitter est certes statique (le rayon ou facteur d'échelle de l'Univers reste constant) mais chaque observateur perçoit les objets qui l'entourent comme animés d'un mouvement apparent de *récession*, c'est-à-dire de *fuite* vers un horizon. Cet effet, appelé *effet de Sitter*, constitue le premier succès prédictif d'un modèle cosmologique.

En effet, lorsque de Sitter fit pour la première fois remarquer cette étrange conséquence de son modèle, il pensa immédiatement à la relier à un phénomène astronomique qui était en train d'être étudié : le décalage spectral des galaxies. Bien qu'il fallut attendre les travaux de Hubble des années 1924-1926 pour que la communauté des astronomes accepte,

³⁶Albert EINSTEIN, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Einstein œuvres choisies, Seuil, 1993, p. 101.

dans sa plus grande partie, que certaines nébuleuses se situent en dehors de notre galaxie et constituent des systèmes galactiques composés de milliards d'étoiles comme la Voie lactée, certains astronomes (dont de Sitter) étaient déjà acquis à cette conception de l'Univers dès les années 1910. Parmi eux, les astronomes étatsunien Vesto Slipher (1875-1969) et William Campbell (1862-1938) entreprirent de décomposer la lumière provenant de ces galaxies — c'est-à-dire en faire un spectre. Sur ce spectre, les raies caractéristiques d'éléments chimiques comme l'hydrogène ou l'hélium apparaissaient décalées, soit vers le violet, soit vers le rouge. Or, de tels décalages peuvent être interprétés comme un effet Doppler-Fizeau, c'est-à-dire un déplacement de la source lumineuse (voir chapitre 1, section 1.4.2).

Les spectres réalisés par Slipher et Campbell indiquant des décalages spectraux, pouvaient donc être interprétés comme les vitesses radiales (la vitesse de rapprochement ou d'éloignement) des galaxies par rapport à la nôtre. De Sitter était au courant de ces résultats, qu'il mentionne dans l'article de 1917 intitulé « On the curvature of space » :

Récemment, les vitesses radiales des nébuleuses ont été observées et sont très importantes, de l'ordre de 1000 km/sec. [...] On ne peut cependant rien dire de certain au sujet d'un déplacement *systématique* des raies spectrales des nébuleuses. S'il était prouvé dans le futur que des objets très distants ont des vitesses radiales apparentes systématiquement positives, cela serait une indication que le système B [celui de de Sitter] et non A [celui d'Einstein], correspond à la vérité³⁷.

Cette affirmation de de Sitter constitue une prédiction portant sur des résultats expérimentaux futurs qui, si elle tombe juste, peut impressionner la communauté scientifique à une époque donnée, puisque celui qui la réalise ne peut pas avoir connaissance de ces résultats expérimentaux futurs et n'a pu les utiliser pour ajuster les variables de son modèle théorique.

Or il s'avère que l'effet de Sitter a bien représenté un succès prédictif important qui a contribué à la formation de la cosmologie comme

³⁷DE SITTER, "On the curvature of space", p. 236.

discipline scientifique.

Lorsque de Sitter publia « On the curvature of space » en 1917 il ne fit référence qu'à trois mesures de décalage spectral de nébuleuses : NGC 4594, NGC 1068 et M31 (la galaxie d'Andromède)³⁸. Seules les deux premiers objets ont un décalage spectral vers le rouge qui indique une vitesse radiale positive, c'est-à-dire qu'ils semblent *fuir* notre galaxie. En revanche, le spectre de M31 est décalé vers le violet, ce qui indique une vitesse négative, c'est-à-dire qu'elle semble se diriger *vers* notre galaxie (à une vitesse d'environ 300 km/sec.).

Autrement dit, lorsque de Sitter prédit que la plupart des objets lointains ont une vitesse apparente positive, seulement 2/3 des données à sa disposition vont dans le sens de sa prédiction. En 1917, alors que la distance des nébuleuses est toujours soumise à débat, rien ne permet d'assurer que les observations futures vérifieront l'effet de Sitter.

Cependant, les observations des astronomes américains montrèrent rapidement que M31 est une exception plutôt que la règle. En 1925 Slipher avait réalisé le spectre de quarante-cinq nébuleuses, dont quatre seulement étaient décalés vers le violet. Tous les autres présentaient un décalage vers le rouge indiquant au contraire une *récession* des galaxies. Ce décalage devient un sujet important de discussion parmi les physiciens théoriciens intéressés par la cosmologie et le modèle B de de Sitter fut l'objet de recherches bien plus importantes que le modèle A d'Einstein, pendant les années 1920³⁹.

Ainsi, le mathématicien allemand Hermann Weyl (1885-1955) publia en 1923 un ouvrage intitulé *Raum, Zeit, Materie* dans lequel il déduit du modèle de de Sitter que le décalage vers le rouge des nébuleuses devrait être *proportionnel* à leur distance. En 1925, le physicien belge Georges Lemaître publia lui aussi un article sur le modèle de de Sitter dans lequel il montra que l'on pouvait en tirer une formule prédisant le décalage vers le rouge des nébuleuses⁴⁰. Le mathématicien et physicien américain Ho-

³⁸DE SITTER, "On the curvature of space", p. 236.

³⁹Pour une liste exhaustive des publications en cosmologie de cette période et des modèles qu'elles discutent, voir George ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 97-113.

⁴⁰Georges LEMAÎTRE, "Note on de Sitter's universe", *Journal of Mathematical Phy-*

ward Robertson — dont les apports en cosmologie furent considérables durant les années 1920 et 1930 et qui fit de Princeton un important centre de diffusion de la cosmologie aux États-Unis — fit lui aussi remarquer en 1928 que dans le modèle d’Univers de de Sitter, bien que l’Univers soit statique, l’Univers observable devrait montrer un mouvement de récession⁴¹. Ces quelques exemples montrent à quel point l’Univers de de Sitter et particulièrement sa capacité à prédire le décalage spectral vers le rouge des nébuleuses, était un sujet d’étude répandu dans les années 1920 parmi la première génération de savants à étudier la cosmologie.

De plus, comme le fait remarquer H. Kragh , « à cette époque, la prédiction de de Sitter d’une corrélation entre la vitesse et la distance s’était aussi répandue dans la communauté des astronomes observateurs [aux États-Unis] »⁴². Ce n’est donc pas un hasard si Hubble, deux ans après avoir réussi à mesurer la distance de plusieurs nébuleuses et à montrer qu’il s’agissait de structures galactiques, se tourna vers un nouveau programme de recherche : mesurer le rapport entre la distance de ces galaxies et leur décalage vers le rouge – reprenant pour cela les données de Slipher. En 1928, il était au courant du débat entre les modèles d’Einstein et de de Sitter et son programme de recherche visait précisément à tester l’effet de Sitter⁴³.

On peut donc considérer que c’est la prédiction de l’effet de Sitter qui est à l’origine de ce programme de recherche qui aboutit en 1929 à la publication de la relation de Slipher-Hubble⁴⁴, établissant que le décalage vers le rouge des galaxies est proportionnel à leur distance. Pourtant, cette loi est souvent présentée comme la découverte de *l’expansion* de l’Univers. Or, non seulement cette découverte fut préparée par la prédiction de l’effet de Sitter, mais, en plus, elle fut présentée par Hubble comme une confirmation empirique du modèle de de Sitter, c’est-à-dire d’un Univers statique (voir chapitre 1, section 1.3). Hubble n’est donc

sics 4 (1925), p. 188–192.

⁴¹HOWARD ROBERTSON, “On relativistic cosmology”, *The Philosophical Magazine and Journal of Science* 5.31 (1928), p. 835–848, p. 847.

⁴²KRAGH, *Cosmology and Controversy*, p. 15.

⁴³KRAGH, *Cosmology and Controversy*, p. 17.

⁴⁴HUBBLE, “A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae”.

pas le « découvreur » de l'expansion de l'Univers, même si, comme on le montre à la fin de ce chapitre, la relation de Slipher-Hubble a été considérée comme une confirmation des prédictions des modèles d'Univers dynamiques.

Avant d'exposer les modèles cosmologiques non statiques et leurs prédictions, on peut se demander pourquoi l'effet de Sitter a eu une telle importance durant les années 1910-1920. La raison en est que l'effet de Sitter manifeste une caractéristique cruciale pour faire d'une prédiction un succès : il faut qu'elle soit connue dans la communauté scientifique contemporaine et qu'elle soit à l'origine des tentatives pour la tester et découvrir de nouveaux phénomènes.

Bien sûr, le fait qu'une prédiction soit connue dépend de nombreux facteurs qui ne sont pas liés à la manière dont elle a été formulée, tels que la langue dans laquelle elle a été publiée ou la réputation de son auteur. Mais le fait qu'elle soit dérivée d'une ou plusieurs hypothèse(s) apparemment extravagante(s) — comme l'absence de matière dans l'Univers — ne joue pas forcément contre sa réputation, surtout si cette hypothèse est la seule qui permet de réaliser cette prédiction. De plus, pour qu'une prédiction soit connue, il faut aussi que cette prédiction soit liée à des prédictions dans d'autres disciplines et notamment des disciplines d'observation. Le succès de la prédiction de l'effet de Sitter, par exemple, n'est pas tant d'avoir été confirmée par la relation de Slipher-Hubble (ce que l'on discute ci-dessous) que d'avoir mené à une découverte qui intéressait autant les astronomes que les physiciens : une relation de proportionnalité entre le décalage spectral et la distance. En effet, une telle relation est intéressante pour un astronome indépendamment de l'interprétation cosmologique que l'on fait de ce décalage spectral, parce qu'elle fournit une nouvelle manière d'évaluer la distance des galaxies. Autrement dit, la relation de Slipher-Hubble a elle-même un pouvoir prédictif crucial dans le domaine de l'astronomie et de l'astrophysique. Ainsi, la prédiction de l'effet de Sitter rencontra du succès parce qu'elle articulait une prédiction guidée par des lois (la prédiction de l'effet de Sitter fondée sur les équations d'Einstein) et une prédiction guidée par des données (la relation de Slipher-Hubble fondée sur une analyse régressive des données

astronomiques).

La prédiction de de Sitter était donc une prédiction *féconde* parce qu'elle semblait indiquer la route pour découvrir une nouvelle relation empirique qui serait, à son tour, la source de nouvelles prédictions.

3.2 1929-1933 : les prédictions des modèles dynamiques d'Univers

3.2.1 La prédiction de Lemaître

La première prédiction de la relation linéaire entre la distance et le décalage vers le rouge des galaxies à partir d'un modèle d'Univers dynamique est à mettre au crédit du physicien belge Georges Lemaître et parut en 1927 dans un article intitulé « Un Univers homogène de masse constante rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques. » Cet article fut publié dans les *Annales de la société scientifique de Bruxelles*, journal en langue française complètement ignoré par les autres scientifiques de l'époque intéressés par la cosmologie, qui écrivaient soit en allemand soit en anglais. Cependant, il ne resta pas lettre morte puisque sa traduction en anglais par Eddington en 1930⁴⁵, dont Lemaître était un ancien étudiant, rendit célèbres les équations différentielles de Friedmann, redécouvertes par Lemaître, équations qui corrént la densité de l'Univers, sa courbure et la constante cosmologique à son taux d'expansion.

Cependant, pour autant que les prédictions sont concernées, l'analyse de Lemaître diffère radicalement de celle de Friedmann : dès les premières lignes de son article, Lemaître cite le modèle de de Sitter dont le « grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extragalactiques semblent nous fuir avec une énorme vitesse, comme une simple conséquence des propriétés du champ de gravitation, sans supposer que nous nous trouvons en un point de l'Univers doué de propriétés spéciales »⁴⁶. Comme on

⁴⁵Georges LEMAÎTRE, "A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91.5 (1931), p. 483–490.

⁴⁶Georges LEMAÎTRE, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon crois-

l'a vu dans la section précédente, Lemaître s'était intéressé dès 1925 au modèle de de Sitter en raison de sa capacité prédictive. Cependant, dans son article de 1927, il remarque que le modèle d'Einstein n'est pas dénué, lui non plus, de capacité prédictive, car il « conduit à une relation entre cette densité [de matière dans l'Univers] et le rayon de l'Univers⁴⁷ », relation qui « a fait prévoir l'existence de masses énormément supérieures à tout ce qui était connu lorsque la théorie a été pour la première fois comparée avec les faits »⁴⁸. De manière assez subtile, Lemaître considère que cette relation a été prouvée par la découverte d'autres galaxies que les nôtres. En réalité, rien n'indique que cette découverte permette de tester le modèle d'Einstein, puisque l'évaluation de la masse et du rayon de l'Univers était bien au-delà de la portée des moyens d'observation de l'époque. Mais Lemaître a raison de souligner que le modèle d'Einstein a effectivement la capacité de réaliser certaines prédictions sur la masse de l'Univers, prédictions dont le modèle de de Sitter est incapable puisqu'il suppose un Univers vide.

Cette comparaison des solutions d'Einstein et de de Sitter concernant leur capacités prédictives respectives permet à Lemaître de présenter son propre modèle d'Univers comme « une solution intermédiaire qui pourrait combiner les avantages de chacune d'elles »⁴⁹ et donc de mettre immédiatement l'accent sur ses relations aux données astronomiques.

La solution « intermédiaire » proposée par Lemaître est identique à celle de Friedmann : le rayon de l'Univers (c'est-à-dire son facteur d'échelle) R n'est pas une constante dans le temps mais une fonction du temps⁵⁰. Mais à la différence de Friedmann cinq ans plus tôt, Lemaître

sant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques”, *Annales de la Société scientifique de Bruxelles, série A* 47 (1927), p. 49–59, p. 49.

⁴⁷Il s'agit de la relation 2. discutée dans la section précédente.

⁴⁸LEMAÎTRE, “Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques”, p. 49.

⁴⁹LEMAÎTRE, “Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques”, p. 50.

⁵⁰On lit parfois que le fait que Lemaître ait été séminariste puis abbé aurait influencé ses recherches vers des modèles d'Univers ayant une origine dans le temps (voir par exemple NORTH, “The Early years”, p. 23). De telles affirmations relèvent du procès d'intention et rien de tel ne peut être prouvé à la lecture de l'article de 1927, lequel ne décrit même pas à un modèle d'Univers ayant un commencement dans le temps, mais un modèle d'Univers éternel avec une phase d'expansion.

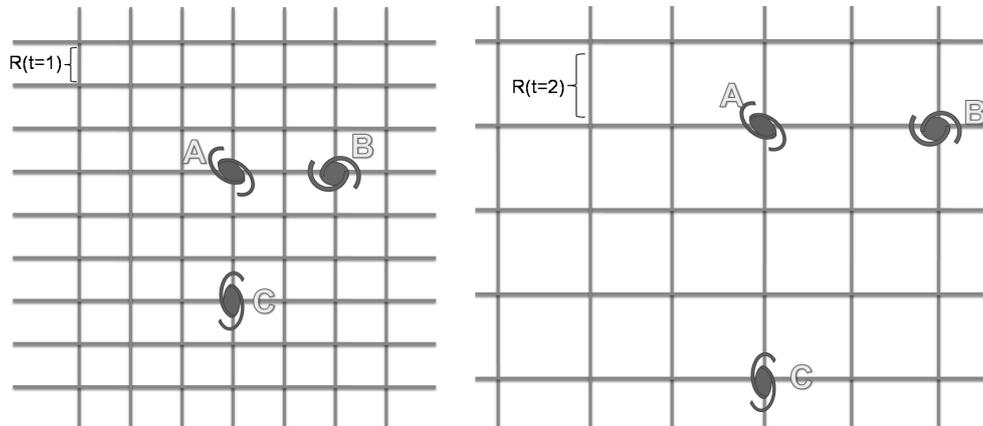


FIGURE 3.1 : Sur cette figure la galaxie A est 1,5 fois plus éloignée de la galaxie C que de la galaxie B. Pour un observateur dans la galaxie A, l'augmentation du facteur d'échelle R entre $t = 1$ (à gauche) et $t = 2$ (à droite) a pour conséquence d'éloigner 1,5 fois plus la galaxie C que la galaxie B. La récession des galaxies est donc proportionnelle à leur distance par rapport à l'observateur, quelle que soit la place de cet observateur dans l'Univers.

en tire immédiatement une conséquence pour les observations astronomiques : c'est l'expansion de l'Univers qui provoque un décalage vers le rouge des galaxies, décalage proportionnel à leur distance⁵¹. En effet, cette expansion a pour effet de multiplier les distances entre les galaxies, ce qui apparaît aux observateurs situés dans une de ces galaxies comme une fuite des autres galaxies. En outre, plus la distance entre les observateurs et une galaxie est grande, plus le résultat de l'expansion de l'Univers sera important et donc plus la galaxie paraîtra fuir les observateurs rapidement⁵². Il en résulte donc que l'expansion de l'Univers a pour effet d'éloigner les galaxies de la nôtre d'autant plus rapidement qu'elles sont lointaines.

Lemaître ne se contente pas de prédire le *fait* que les galaxies sont décalées vers le rouge proportionnellement à leur distance : il calcule aussi la *valeur* de cette proportion qu'il interprète comme le taux d'expansion de l'Univers. À partir d'un article de l'astronome étatsunien Gustav

⁵¹LEMAÎTRE, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", p. 56.

⁵²Voir la figure 3.1 pour une illustration et l'annexe pour le détail mathématique de la prédiction de Lemaître.

Strömberg (1882-1962) qui reprenait les données sur les décalages spectraux des nébuleuses obtenues par Slipher⁵³ et des mesures de distance des mêmes galaxies obtenues par Hubble, Lemaître réussit à évaluer la valeur de la constante de Hubble⁵⁴ avant même que celui-ci ne lance le programme de recherche qui le mènera à découvrir la relation qui porte aujourd'hui son nom⁵⁵.

Lemaître n'était ni le premier à prédire le décalage vers le rouge des galaxies, ni le premier à prédire la proportionnalité de ce décalage et de leur distance, ni le premier à avoir mesuré ces décalages vers le rouge ou la distance des galaxies. Il n'est pas, enfin, le premier à avoir trouvé des solutions non statiques aux équations d'Einstein. Mais il est bien le premier à avoir vu le rapport entre tous ces éléments.

On n'entrera pas ici dans des querelles de priorité, dont la complexité est disproportionnée par rapport au bénéfice que l'on pourrait espérer de leur résolution. Cependant, il semble bien que l'idée selon laquelle c'est Hubble ou Friedmann qui est à l'origine de la découverte de l'expansion de l'Univers soit une idée assez récente. Comme le remarquent les historiens H. Kragh et Robert Smith, dans les années 1930 c'est à Lemaître (après la traduction de son article en anglais) que la plupart des astronomes, physiciens et mathématiciens intéressés par la cosmologie, attribuent la paternité de l'expansion de l'Univers :

En 1931, de Sitter annonça que la solution de l'énigme concernant le choix entre les modèles A et B avait été fournie par Lemaître dont « la brillante découverte, l'"Univers en expansion", a été découverte par le monde scientifique un an et demi auparavant, trois ans après sa publication. » En 1933, Eddington rapporte dans son ouvrage *The Expanding Universe* que [...] « les recherches délibérées de solutions non statiques par Friedmann » ont été redécouvertes par Lemaître

⁵³Gustav STRÖMBERG, « Anaysis of Radial Velocities of Globular Clusters and Non Galactic Nebulae », *in* : *The Astrophysical Journal* 61 (1925).

⁵⁴LEMAÎTRE, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques", p. 294.

⁵⁵Hubble n'admit d'ailleurs jamais que la relation entre le décalage vers le rouge et la distance des galaxies soit une preuve de l'expansion de l'Univers plutôt qu'une vitesse apparente explicable par d'autres mécanismes.

« qui développa brillamment la théorie astronomique qui en résultait »⁵⁶.

Il semble donc que les contemporains de Lemaître, malgré la redécouverte tardive de son article, aient considéré qu'il avait prédit l'expansion de l'Univers, prédiction confirmée par les travaux de Hubble et non que Hubble ait été à l'origine de la découverte de l'expansion de l'Univers qui aurait par la suite forcé les cosmologistes à ajuster leurs modèles pour tenir compte de ce fait.

De plus, cette prédiction fut effectivement considérée comme un succès, si l'on considère son impact sur des scientifiques comme de Sitter qui, pourtant, avait proposé un modèle d'Univers menant à la même prédiction. Celui-ci déclara en effet dans une courte note au journal *Nature* en 1931 qu' « une solution d'une simplicité telle qu'elle apparaisse évidente d'elle-même [...] ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie »⁵⁷. Einstein et de Sitter écrivirent même un article ensemble en 1931⁵⁸ qui adoptait les solutions dynamiques de l'équation de Friedmann-Lemaître et aboutit à un modèle d'Univers dont la courbure et la constante cosmologique sont nulles (l'Univers Einstein-de Sitter).

Ainsi, les prédictions ont joué un rôle décisif dans la formation de la cosmologie scientifique, en montrant que les modèles de de Sitter, puis de Friedmann-Lemaître, pouvaient être reliés aux observations des décalages spectraux des galaxies, ce qui provoqua un premier rapprochement entre physiciens théoriciens et astronomes observateurs dans les années 1920, puis une transformation majeure des débats cosmologiques dans les années 1930. Mais pourquoi est-ce la prédiction de Lemaître et non celle de l'effet de Sitter, qui fut à l'origine du premier consensus dans l'histoire de la cosmologie moderne alors qu'elles prédisent la *même* relation observable entre la distance et le décalage vers le rouge des galaxies ?

⁵⁶Helge KRAGH et Robert SMITH, "Who Discovered the Expanding Universe?", *History of Science* 41 (2003), p. 141–162, p. 158.

⁵⁷Cité par ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", p. 105.

⁵⁸Albert EINSTEIN et Willem DE SITTER, "On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 18.3 (1932), p. 213.

3.2.2 Un cas de sous-détermination prédictive

La comparaison entre la prédiction de l'effet de Sitter et celle de Lemaître est un cas d'école intéressant, quoique trop peu étudié⁵⁹. Comme on l'a vu, elles ont toutes deux connu un certain succès, mais d'ampleur différente. D'un point de vue scientifique, la différence entre ces deux prédictions n'est ni dans le phénomène prédit (la récession des galaxies) ni dans la théorie dont elles sont tirées (la relativité générale). Cette différence n'est que dans le raisonnement prédictif, c'est-à-dire dans les étapes de la série d'inférence qui permettent de dériver ce phénomène astronomique à partir des équations des champ de la relativité générale.

Le cas rencontré ici de deux prédictions différentes du même phénomène illustre une difficulté de certaines philosophies de la confirmation et du réalisme scientifique⁶⁰ et qui s'apparente à ce que l'on appelle, au moins depuis les travaux de Willard Quine⁶¹, la *sous-détermination empirique des théories scientifiques*. Cela désigne le fait qu'il existe plusieurs systèmes théoriques empiriquement équivalents, c'est-à-dire qui prédisent les mêmes données expérimentales. Cependant, dans le cas de la prédiction du même phénomène par l'effet de Sitter et par le modèle d'Univers dynamique de Lemaître, il s'agit de deux manières différentes de réaliser une prédiction *à partir du même système théorique* (la relativité générale). C'est pourquoi il ne s'agit pas ici d'une sous-détermination empirique de *systèmes théoriques*, mais d'une sous-détermination *des prédictions* au sein d'un même système théorique.

Les questions que l'on se pose ici sont les suivantes : quelles différences y a-t-il entre le raisonnement prédictif de de Sitter et celui de Lemaître ? Ces différences peuvent-elles expliquer le succès des modèles d'Univers en expansion sur l'Univers de de Sitter ?

La première explication du moindre succès de la prédiction de de Sitter par rapport à celle de Lemaître est qu'elle est fondée sur un modèle

⁵⁹Pour une des seules études des mérites respectifs de ces deux prédictions, voir ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", p. 99.

⁶⁰Voir chapitre 7, section 7.4 et chapitre 8, section 8.2.

⁶¹Willard QUINE, "On empirically equivalent systems of the world", *Erkenntnis* 9.3 (1975), p. 313–328.

qui a des inconvénients embarrassants. Rappelons que l'Univers de de Sitter n'a aucune densité, ce qui en fait un modèle très idéalisé de l'Univers réel. Cependant, cette idéalisation lui est rarement reprochée, que ce soit par ses contemporains ou les cosmologistes actuels qui continuent d'étudier les propriétés intéressantes du modèle de de Sitter.

En revanche, un problème important de ce modèle vient du fait que chaque observateur, dans l'Univers de de Sitter, a un « horizon », c'est-à-dire une distance au-delà de laquelle il ne peut percevoir d'événements. Cela, en soi, n'est pas étonnant, puisque tout observateur dans l'Univers a un horizon qui est proportionnel au temps que met la lumière à lui parvenir depuis des événements distants⁶². Mais les horizons de l'Univers de de Sitter sont particuliers : les corps au repos semblent attirés vers lui, mais n'ont plus de vitesse lorsqu'ils l'atteignent⁶³. Seul l'observateur n'est pas attiré par son horizon. Autrement dit, dans l'Univers de de Sitter, il n'y a que les corps qui passent par l'origine du référentiel qui suivent des géodésiques de l'espace-temps, les autres accélèrent vers l'horizon avant de l'atteindre et de rester au repos.

On pourrait donc avoir l'impression que l'Univers de de Sitter était criblé de défauts. Son seul succès étant la prédiction des décalages vers le rouge des galaxies, on se serait empressé de s'en débarrasser dès lors que d'autres modèles d'Univers — ceux en expansion — ont permis de réaliser la même prédiction.

En réalité ces « défauts » de la solution de de Sitter font son originalité et son utilité parce qu'ils permettaient de prédire la récession des galaxies et de définir un état de l'Univers (connu sous le nom de phase de de Sitter) qui a un grand rôle dans les théories de l'inflation développées dans les années 1980⁶⁴. Mais, si l'on se reporte au jugement, que prononça de Sitter lorsqu'il prit connaissance du modèle de Lemaître, il semblerait

⁶²Un événement situé à une année-lumière de la Terre est ainsi en dehors de notre horizon pendant une année après s'être produit, parce que la lumière qui en provient ne peut nous avoir atteint.

⁶³Cette différence entre deux types d'horizons — un horizon « particule » et un horizon « événement » n'a cependant été clarifiée qu'en 1956 par Wolfgang RINDLER, « Visual Horizons in World Models », *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 116, 1956, p. 335–350.

⁶⁴Voir chapitre 5 et son annexe.

que ce que de Sitter appréciait dans la prédiction de Lemaître soit sa « simplicité » qui « ne peut laisser le moindre doute que la théorie de Lemaître est essentiellement vraie »⁶⁵.

Même si l'on laisse de côté l'idée selon laquelle la *simplicité* du modèle de Lemaître serait une preuve de sa *vérité*, on peut être étonné par cette affirmation de de Sitter. En quoi, en effet, le modèle de Lemaître est-il plus simple que celui de de Sitter ? Le modèle de de Sitter semble une des solutions les plus simples possibles des équations de la relativité générale puisqu'elles tendent toutes vers 0 l'infini⁶⁶. À l'inverse, les modèles d'Univers dynamiques de Friedmann-Lemaître semblent *compliquer* la théorie relativité générale en instaurant un nouveau paramètre qui dépend du temps : le facteur d'échelle de l'Univers. Les modèles d'Univers de Friedmann-Lemaître semblent donc faire intervenir *plus* de variables et donc être *plus* complexes que les modèles statiques.

Mais la « simplicité » d'une théorie ou d'un modèle n'est jamais chose aisée à définir (voir chapitre 7, section 7.3) et bien souvent elle dépend du contexte et de l'objectif poursuivi par celui qui la juge. Or, dans le cas qui nous intéresse ici, c'est la simplicité *prédictive* qui importe, c'est-à-dire la simplicité pour mener à bien le raisonnement prédictif qui relie des principes théoriques à des phénomènes observés.

Or, dans le cas de de Sitter, ce raisonnement prédictif est très complexe. D'une part, il ne découle pas directement du modèle de de Sitter que le décalage des galaxies vers le rouge soit proportionnel à leur distance. À l'inverse, dans les modèles d'Univers en expansion, cette proportionnalité est une conséquence « naturelle » des équations de Friedmann-Lemaître, les équations différentielles reliant le taux d'expansion de l'Univers à sa densité de l'Univers, sa courbure et la constante cosmologique. En effet, si ces trois derniers paramètres sont fixés, alors le taux d'expansion d'Univers est constant (à une époque donnée de l'Univers), ce qui implique que la récession des galaxies et donc leur décalage vers le rouge est proportionnel à leur distance (voir l'annexe au chapitre 3 pour une démonstration).

⁶⁵Cité par ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", p. 105.

⁶⁶Voir l'annexe au chapitre 3 pour plus de détails.

Ainsi, même si les modèles d’Univers dynamiques sont plus complexes que le modèle de de Sitter, ils permettent cependant de résumer les relations entre les principaux paramètres cosmologiques en des équations différentielles simples d’utilisation dont on peut, en quelques étapes, déduire la formule permettant de mesurer le décalage vers le rouge des galaxies en fonction de leur distance⁶⁷. De plus, cette formule est précisément celle qu’obtint Hubble en 1929 : la prédiction de Lemaître était donc à la fois plus simple et plus précise que celle de de Sitter.

Pour prendre une analogie avec un autre cas d’histoire des sciences plus connu et plus étudié, on peut comparer le modèle de de Sitter au modèle ptoléméen du système solaire et le modèle de Friedmann-Lemaître au modèle copernicien. Les deux modèles ptoléméens et coperniciens étaient fondés sur les mêmes principes théoriques : rendre compte du déplacement des planètes par une composition d’orbites circulaires et de mouvements uniformes. Le modèle copernicien n’était pas *en soi* plus simple que celui de Ptolémée si l’on prend comme mesure de la simplicité le nombre d’épicycles et de paramètres à ajuster pour obtenir les positions d’une planète donnée au cours du temps⁶⁸. En revanche, si l’on se concentre sur *la manière* dont on peut prédire le mouvement rétrograde des planètes, le système copernicien utilise un raisonnement prédictif à la fois plus simple et plus précis que le système ptoléméen, puisqu’aucun épicycle n’est nécessaire pour le réaliser⁶⁹.

De même, le modèle de de Sitter et celui des Univers dynamiques proviennent tous deux des mêmes équations et il est difficile d’estimer lequel est *en soi* le plus simple. En revanche, si l’on se concentre sur la manière de prédire un phénomène qui revêt particulièrement d’importance aux yeux des contemporains, alors on peut affirmer que les

⁶⁷Il ne faut à Lemaître que quelques lignes pour déduire la formule du décalage vers le rouge à partir de l’équation de Friedmann-Lemaître. En revanche, il fallut à Weyl un mémoire entier d’une complexité telle que Robertson lui demanda de l’aide pour le comprendre, pour obtenir un effet de Sitter où le décalage est proportionnel à la distance. Cf. MERLEAU-PONTY, *Cosmologie du XXe siècle*, p. 63.

⁶⁸Voir à ce sujet Owen GINGERICH et James MACLACHLAN, *Nicolaus Copernicus : Making the Earth a Planet*, Oxford, Oxford University Press, 2005, chapitre 4.

⁶⁹Dans le modèle copernicien, les épicycles sont utilisés pour faire en sorte que les orbites soient des cercles centrés sur le Soleil et non pour prédire la rétrogradation des planètes.

modèles d'Univers dynamiques sont plus simples et plus précis, parce qu'ils mènent plus *naturellement* à la prédiction d'une récession des galaxies en fonction de leur distance. En effet, si l'on utilise les équations de Friedmann-Lemaître, il faudrait que la constante cosmologique, la courbure et la densité de l'Univers soient des variables très finement ajustées pour que le taux d'expansion de l'Univers soit égal à zéro et que l'on observe aucun mouvement des galaxies proportionnel à leur distance (voir annexe au chapitre 3). La prédiction de la récession des galaxies à partir des équations de Friedmann-Lemaître est donc bien plus *robuste* que la même prédiction à partir du modèle de de Sitter (voir chapitre 2, section 2.2.2).

Mais pourquoi se concentrer sur la prédiction d'un phénomène en particulier et en quoi la simplicité et la précision du raisonnement prédictif représentent-elles un succès ? Dans le cas de la prédiction du décalage spectral des galaxies vers le rouge, c'est parce que ce phénomène était l'un des plus étonnants — et, pour cette raison, un des plus connus — pour les astronomes et physiciens des années 1910-1920. De même, le mouvement rétrograde des planètes étaient, pour l'astronomie de l'antiquité et du moyen-âge, l'un des phénomènes les plus surprenants et les plus difficiles à prédire. Réaliser simplement et précisément une prédiction de ce type de phénomène surprenant est une gageure qui impressionne les contemporains et qui acquiert rapidement la réputation de succès⁷⁰.

3.2.3 Le succès prédictif des modèles d'Univers dynamiques

Si l'on résume les analyses réalisées jusqu'ici, on peut schématiser la majorité des raisonnements prédictifs en cosmologie en plusieurs étapes comme suit :

1. Le point de départ de ces raisonnements est un ensemble d'équations : les équations de la relativité générale.

⁷⁰On verra cependant dans le chapitre 6 (section 6.4) que l'on ne peut donner à une prédiction un poids dans la preuve d'une hypothèse proportionnel au caractère surprenant du phénomène prédit sans affronter un épineux problème connu sous le nom de « problème des preuves déjà connues ».

2. L'étape suivante est la construction d'un *modèle* d'Univers, c'est-à-dire d'une géométrie de l'espace-temps qui satisfait les équations de la relativité générale. Cette construction peut être appelée *modèle* pour deux raisons différentes. D'une part, parce qu'il s'agit d'un ensemble de valeurs de variables qui satisfont les équations fondamentales d'une théorie. D'autre part, parce que ces variables sont fixées à partir de supposition souvent idéalisées (comme le principe d'homogénéité de l'Univers) qui ont pour rôle de simplifier la réalité afin d'appliquer ces équations.
3. Ce modèle d'Univers est ensuite modifié et ajusté pour en déduire des relations entre la valeur de certaines grandeurs. Si les relations entre ces grandeurs ne peuvent être soumises à des tests, on parle de prédiction théorique et le raisonnement prédictif s'arrête là. Sinon il se poursuit à l'étape suivante.
4. Les données d'observations sont analysées statistiquement pour obtenir des relations entre grandeurs comparables à celles qui sont tirées du modèle. Cette étape est-elle même une forme de prédiction guidée par des données qui aboutit à un modèle statistique⁷¹.
5. Les relations entre grandeurs du modèle d'Univers sont comparées à celles du modèle statistique issu des données.

On voit donc que les trois différents types de prédictions distinguées à la fin de la première partie de cette thèse (prédictions guidées par des lois, des modèles ou des données) interviennent dans les raisonnements prédictifs en cosmologie, puisque l'étape 1. est fondée sur des équations qui ont statut de loi scientifique, l'étape 2. fait intervenir la construction d'un modèle idéalisé et l'étape 4. s'appuie sur une analyse statistique de données.

Ainsi, les succès prédictifs de Lemaître et de de Sitter ne peuvent-ils être identifiés à un seul et unique des trois types de prédictions étudiés dans la première partie de cette thèse : ces types de prédiction sont des *idéaux-types* qui se combinent dans les travaux scientifiques réels.

⁷¹Voir chapitre 1 section 3.2.

Cependant, on peut, à partir de ces idéaux-types, distinguer plusieurs éléments qui ont été cruciaux dans les succès prédictifs ayant joué un rôle important dans la formation de la cosmologie scientifique, c'est-à-dire ceux de l'effet de Sitter et de la prédiction de Lemaître :

- Ces deux succès sont dérivés d'hypothèses dont le caractère irréaliste, simplifié ou idéalisé (étape 2.) a pu surprendre les contemporains, mais n'a pas empêché leur intérêt. Cela illustre à nouveau le fait qu'une prédiction peut être un succès même si elle implique des éléments considérés comme faux, contradictoires ou idéalisés.
- Ces deux succès impliquent des prédictions qui n'étaient pas strictement théoriques mais *testables* puisqu'elles étaient reliées à la prédiction de grandeurs observables (étapes 4. et 5.) : la distance des galaxies et leur décalage vers le rouge.
- Pour la même raison, ces deux succès étaient *féconds* : ils montrent que les considérations cosmologiques peuvent être reliées à des problèmes dans d'autres disciplines, comme l'astronomie et qu'ils peuvent mener à de nouvelles découvertes et prédictions dans ces autres disciplines (étape 4.).
- Enfin, la prédiction de Lemaître semble découler *plus naturellement* que celle de de Sitter parce que sa prédiction est plus *robuste* (voir chapitre 2, section 2.2.2). En effet, pour passer de l'étape 3. à l'étape 5., il est nécessaire d'ajuster le modèle de de Sitter pour en fixer certains paramètres, alors que ce passage ne nécessite pas cette étape supplémentaire dans le cas des modèles dynamiques.

Maintenant que ces succès prédictifs importants dans la formation de la cosmologie ont été caractérisés, on peut répondre à la question posée au début de cette partie : quel rôle ont joué les prédictions dans l'apparition de la cosmologie et quelles implications peut-on en tirer quant à la question du changement théorique ?

3.3 Conclusion du chapitre : succès prédictif et changement de paradigme en cosmologie pendant les années 1930

3.3.1 Le problème de la maturité scientifique d'une discipline

Savoir quand une discipline devient une *science* est un problème majeur de la philosophie et de l'historiographie des sciences, car elle est intimement liée au problème de démarcation entre les disciplines scientifiques et non scientifiques.

On peut faire remonter cette question à la préface de la deuxième édition de la *Critique de la Raison Pure* dans laquelle Emmanuel Kant (1724-1804) introduit la question de la scientificité de la métaphysique en étudiant comment les mathématiques, la physique et la chimie ont été mises « sur la voie sûre d'une science ». Dans le cadre du projet philosophique kantien, ces exemples sont érigés en modèles pour montrer que la métaphysique n'a pas connu la « révolution copernicienne » ayant permis aux authentiques sciences de la nature de produire des connaissances qui font consensus (par opposition au « champ de bataille de la métaphysique ») et qui sont en progrès (par opposition à la métaphysique où chaque auteur reprend son sujet au commencement). Kant souligne donc deux critères importants pour pouvoir parler de scientificité d'une discipline : elle doit faire l'objet d'un consensus, consensus qui permet ensuite aux savants de réaliser de nouvelles recherches.

Le philosophe et historien des sciences Thomas Kuhn (1922-1996) a proposé des critères de démarcation étonnamment similaires à ceux de Kant au XX^e siècle, lorsqu'il chercha à montrer comment une discipline s'achemine vers la « science normale », qui est, selon lui, le régime le plus fréquent et le plus régulier de l'activité scientifique. Kuhn affirme que le critère de l'établissement de la science normale est la présence d'« accomplissements suffisamment remarquables pour soustraire un groupe cohérent d'adeptes à d'autres formes d'activité scientifique concurrentes ». Ces succès doivent donc ouvrir « des perspectives suffisamment vastes

pour fournir à ce nouveau groupe de chercheurs toutes sortes de problèmes à résoudre »⁷². Autrement dit, c'est lorsqu'une discipline connaît un succès — comme les recherches de Benjamin Franklin (1706-1790) sur l'électricité par exemple — qu'un ensemble de connaissances va faire consensus et permettre le développement de recherches spécialisées. C'est cet ensemble de connaissances, qui est à la fois une théorie faisant certains postulats sur la nature de la réalité et une méthode de recherche pour définir et traiter les problèmes dans un domaine donné, que Kuhn nomme un *paradigme*. L'apparition d'un premier paradigme organise un domaine de recherche en discipline scientifique : « L'acquisition d'un paradigme et des types plus ésotériques de recherche qu'il permet est un signe de maturité dans le développement de n'importe quel domaine scientifique donné »⁷³.

Ainsi Kuhn propose-t-il une conception de la maturité des sciences proche de celle de Kant : c'est l'apparition de succès faisant consensus et permettant de définir les frontières des recherches à venir qui marquent l'entrée d'une discipline sur la voie sûre d'une science. Si, à la différence de Kant, Kuhn ne cherche pas à caractériser précisément de quel type de succès il s'agit, il remarque néanmoins un symptôme de cette maturité : l'apparition de manuels et de journaux spécialisés dans la publication d'articles traitant les problèmes laissés ouverts dans les manuels⁷⁴.

Le problème de savoir quel type de succès délimite les sciences matures des disciplines non scientifiques resurgit à la fin du XX^e siècle dans le cadre du débat sur le réalisme scientifique et de l'induction pessimiste (voir introduction, section 3). Lorsque L. Laudan formule cette induction, il se fonde sur un certain nombre de cas de théories telles que la théorie astronomique des orbites cristallines, la théorie médicale des humeurs, la théorie corpusculaire de la lumière ou la théorie de l'éther optique⁷⁵.

Cependant, on peut faire diminuer sensiblement cette liste en ne conservant que les sciences « matures », c'est-à-dire celles dans lesquelles

⁷²Thomas KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*, trad. par Laure MEYER, Flammarion, 1962, p. 29-30.

⁷³KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*, p. 31.

⁷⁴KUHN, *La structure des révolutions scientifiques*, p. 41.

⁷⁵LAUDAN, "A Confutation of Convergent Realism", p. 33.

les recherches ne se font pas de manière dispersées, chaque auteur et chaque théorie reprenant à zéro, mais au contraire se succèdent en essayant de conserver et d'augmenter la somme des connaissances déjà acquises. Les théories des disciplines qui ne sont pas des sciences matures sont à peine scientifiques et n'auraient donc pas plus leur place dans la liste de L. Laudan que l'astrologie sumérienne ou les lois de Murphy.

La liste de L. Laudan ne comprendrait alors plus que quelques cas délicats, comme celui des théories ondulatoires de la lumière supposant un fluide élastique en repos absolu nommé « éther », pour lesquels il faut proposer un autre argument.

Cependant, comme le fait remarquer J. Worrall, cette stratégie ne tient que si l'on peut donner un « critère raisonnablement précis et *in-dépendant* de la maturité [d'une science] »⁷⁶, sinon on risque de tomber dans le raisonnement *ad hoc* suivant : « lorsqu'il semble clair que les hypothèses d'une théorie précédemment acceptée ont été aujourd'hui totalement rejetées, il suffit de qualifier automatiquement la science à laquelle elle appartient d'immature à l'époque où la théorie a été acceptée »⁷⁷.

C'est à cette occasion que J. Worrall propose, comme critère d'une science « mature », la capacité à réaliser des prédictions de lois empiriques encore inconnues (voir introduction et chapitre 1, section 1.3). C'est ce type de succès prédictif qui ferait qu'une discipline se transforme en science mature. Par la suite, cette science mature serait en progrès malgré des révolutions épisodiques et cette progression lui permettrait d'échapper aux conclusions de l'induction pessimiste de L. Laudan et de s'acheminer vers une description de plus en plus complète de la réalité.

Si l'on considère l'histoire de la naissance de la cosmologie, peut-on considérer que les succès prédictifs lui ont permis de devenir une science mature et que le critère de J. Worrall correspond au déroulement réel de l'histoire des sciences ?

⁷⁶WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", p. 113.

⁷⁷WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", p. 113.

3.3.2 L'acquisition du premier paradigme cosmologique

On a vu dans la première section de ce chapitre que le modèle d'Einstein, que l'on considère souvent comme l'acte de naissance de la cosmologie, est prédictif mais n'a pas rencontré de *succès* prédictif. Donc, si l'on fixe, comme North ou Merleau-Ponty, la formation de la cosmologie scientifique à cette date, il est clair que ce ne sont pas les succès prédictifs qui peuvent être pris comme critère de maturité d'une discipline.

Cependant, la définition de la maturité telle qu'elle est donnée par Kant et Kuhn implique qu'il y ait des connaissances qui fassent *consensus*. Or, entre 1917 et 1929, on ne trouve aucun consensus sur la structure de l'Univers. On ne trouve pas non plus de manuel ou de journaux spécialisés en cosmologie durant cette période. D'un autre côté, cette période est marquée par le débat entre le modèle d'Einstein et celui de de Sitter, qui semble bien définir à la fois les problèmes que doit traiter la cosmologie et la manière de les traiter, ce qui est une des conséquences de l'acquisition d'un paradigme. Il semblerait donc que durant cette période, la cosmologie soit dotée d'un proto-paradigme : la relativité générale permet de définir une classe de problèmes qui consiste à trouver des solutions cosmologiques, mais il n'y a pas de consensus sur *une* solution ou même sur une classe de solutions (statiques ou dynamiques).

En revanche, une fois établie par la prédiction de Lemaître et confirmée par les travaux de Hubble, l'expansion de l'Univers est une connaissance qui a fait consensus parmi les cosmologistes. On peut donc qualifier cette période de révolution scientifique ayant provoqué un changement de paradigme en cosmologie. En effet, plusieurs travaux, dont ceux du cosmologiste et philosophe de la cosmologie George Ellis, ont montré qu'au début des années 1930 l'immense majorité de la communauté des scientifiques intéressés par les questions cosmologiques cessent de discuter les modèles A et B d'Einstein et de Sitter et se mettent à étudier des modèles d'Univers dynamiques. Cela montre que la communauté des cosmologistes⁷⁸ s'est globalement convertie – à quelques exceptions no-

⁷⁸La communauté des cosmologistes n'était pas constituée de cosmologistes de formation à cette époque, puisqu'il n'existait alors ni cursus ni diplôme de cosmologie.

tables près sur lesquelles on revient plus loin – à l'idée d'un Univers en expansion. Cette conversion est la marque de ce que Kuhn considère être une révolution scientifique s'opérant par changement de paradigme⁷⁹.

En 1933, par exemple, Robertson écrit pour la *Review of Modern Physics* un article censé faire l'état des lieux de la recherche en cosmologie, qui présente les progrès de cette discipline depuis 1917⁸⁰. Comme le fait remarquer G. Ellis, Robertson donne une grande importance aux premières tentatives qui ont eu lieu dans les années 1920 pour trouver des modèles d'Univers dynamiques : « on peut avoir l'impression que cet état de la recherche réagit contre le point de vue du précédent paradigme au point de cacher, peut-être par inadvertance, le thème central de cette période »⁸¹. Paradoxalement, c'est précisément le fait que le regard de Robertson sur le passé proche de sa discipline soit déformé qui indique le mieux que la cosmologie a connu un changement de paradigme au tournant des années 1930, puisqu'un des effets de toute révolution scientifique est de transformer la vision que les scientifiques ont de leur propre discipline et de les amener à réécrire son passé pour donner l'impression d'un progrès graduel des connaissances.

Or, comme on l'a montré, la prédiction de Lemaître a joué un rôle décisif dans le consensus concernant l'expansion de l'Univers et par conséquent dans l'apparition de ce premier paradigme de la cosmologie. Si l'on se tient à la définition donnée par Kuhn de la maturité d'une discipline et de l'acquisition d'un paradigme, il faut donc admettre que la cosmologie scientifique n'est née qu'au tournant des années 1930 et que cette nais-

Cette communauté regroupait tout ceux – physiciens, mathématiciens, astrophysiciens, astronomes, géomètres – qui s'intéressent aux problèmes liés à la structure à grande échelle de l'Univers.

⁷⁹Voir le tableau des publications en cosmologie durant cette période donné par ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", p. 103. Le terme de « paradigme » n'a pas forcément dans cet article le sens précis que lui donne Kuhn dans *La Structure des révolutions scientifiques*. Il s'agit plus largement d'un « point de vue fondamental sur la nature de la cosmologie en tant que sujet d'étude scientifique. » Il semble cependant que la description que G. Ellis donne de la transformation de la cosmologie au tournant des années 1930 est conforme au modèle des révolutions scientifiques élaboré par Kuhn.

⁸⁰Howard ROBERTSON, "Relativistic Cosmology", *Reviews of Modern Physics* 5.1 (1933), p. 62.

⁸¹ELLIS, "Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe", p. 107.

sance a en grande partie été provoquée par un succès prédictif. Ce fait semble confirmer la conception de J. Worrall d'une science « mature » caractérisée par ses succès prédictifs. Cependant, si la cosmologie a bien acquis son premier paradigme durant les années 1930, cela ne signifie pas pour autant qu'elle ait été considérée comme une science mature par l'ensemble des scientifiques.

3.3.3 La cosmologie est-elle considérée comme une science mature en 1937 ?

Les notions de « voie sûre d'une science » et de « science mature » supposent toutes deux, par les comparaisons qu'elles impliquent avec une route et un organisme, qu'une fois qu'une discipline a passé un certain seuil de développement, elle s'organise comme les autres sciences et progresse de manière régulière jusqu'à la prochaine révolution scientifique. C'est pour cela que Kuhn considère que l'acheminement vers la science normale atteint son terme lorsqu'apparaissent des manuels et des journaux spécialisés qui sont les conditions de ce progrès régulier.

Cependant, on ne trouve ni manuels ni journaux spécialisés en cosmologie pendant la période qui suit l'établissement du paradigme de l'Univers en expansion. Au contraire, la fin des années 1930 fut marquée par la discussion de théories cosmologiques hétérodoxes, comme la « cinématique relativiste » de l'astrophysicien britannique Edward Milne (1896-1950)⁸², qui n'étaient pas dérivées de la théorie de la relativité générale. Ces théories provoquèrent un rejet de la cosmologie parmi les astronomes observateurs attachés à une vision de la science fondée sur les observations. Ainsi, en 1937, l'astronome britannique Herbert Dingle (1890-1978) publia dans le journal *Nature* un article intitulé « Modern Aristotelianism » qui questionnait la scientificité de la cosmologie en s'attaquant à sa méthode, méthode qui outrepasserait l'empirisme nécessaire à toute recherche scientifique selon lui. Trois mois plus tard, dans le numéro 3528 daté du 12 juin, seize articles répondant à celui de Dingle —

⁸²Edward MILNE, *Relativity, Gravitation and World-structure*, New York, Clarendon Press, 1935.

allant dans son sens ou le critiquant — furent publiés dans *Nature*⁸³.

Ces discussions ne manquent pas d'intérêt, mais portent essentiellement sur les fondements de la cosmologie (voire des sciences empiriques en général) et n'ont eu que peu d'impact sur les liens entre cosmologie et observations. Elles ne menèrent à aucune nouvelle prédiction et elles mirent plutôt en lumière le statut ambigu de la cosmologie à la veille de la Seconde guerre mondiale : il s'agissait d'un sujet suffisamment important pour que *Nature* lui consacre un supplément de quinze pages, mais dont le statut scientifique était encore remis en question par une grande partie de la communauté scientifique.

Ainsi, le cas de la cosmologie souligne les limites de la notion de science « mature », notion qui repose sur une perception *rétrospective* de l'histoire des sciences puisqu'elle suppose qu'un succès qui nous apparaît aujourd'hui comme suffisant pour juger de la scientificité d'une discipline l'était aussi pour les contemporains de ce succès. Or, s'il y a peu de doute qu'en 1937 la cosmologie apparaissait comme une discipline scientifique sérieuse aux yeux de chercheurs qui s'y intéressaient, elle était cependant encore perçue par une grande partie du reste de la communauté scientifique comme une bizarrerie à la frontière entre science et métaphysique. Ainsi, une discipline ne devient pas une science mature par la grâce d'un seul succès, soit-il aussi impressionnant que la prédiction de l'expansion de l'Univers. Pour de nombreux scientifiques, dont Hubble lui-même, ce succès n'était pas suffisant pour établir avec certitude que les vitesses radiales des galaxies devaient être attribuées à une expansion de l'Univers et d'autres explications comme le fait que la lumière qui nous vient des galaxies lointaines puisse se « fatiguer » le long de son parcours (et ainsi se décaler vers le rouge) sont proposées.

L'idée, partagée par Kant, Kuhn et J. Worrall, ainsi que par de nombreux historiens de la cosmologie, selon laquelle on pourrait *dater* la naissance d'une science, semble donc hasardeuse : avant qu'une discipline ne soit reconnue comme scientifique par d'autres chercheurs que

⁸³Pour une étude détaillée des débats méthodologiques qui eurent lieu en cosmologie durant les années 1930, voir George GALE, “Cosmology : Methodological Debates in the 1930s and 1940s”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward ZALTA, été 2015, 2015

ceux qui participent à son développement, elle doit engranger non pas un mais plusieurs succès. Il vaut donc mieux parler de *formation* de la cosmologie scientifique entre les années 1890 et les années 1930 plutôt que d'une *naissance* qui aurait eu lieu précisément en 1917 (ou en 1929), si l'on ne veut pas entretenir l'illusion qu'un seul succès isolé suffit à faire passer une discipline de l'état de champ de recherches dispersées à celui d'une science institutionnalisée et reconnue.

Ainsi, même si les succès prédictifs ont eu un rôle majeur dans la formation de la cosmologie des années 1910 aux années 1930, ces succès étaient trop isolés pour transformer cette discipline en une science acceptée comme telle par toute la communauté scientifique. Il faut pour cela attendre les développements de la cosmologie durant la seconde partie du XX^e siècle, succès qui sont étudiés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Le rôle des prédictions dans le développement de la théorie du big bang de 1948 à la fin des années 1970

La Seconde Guerre mondiale bouleversa profondément les théories et les moyens techniques dont disposaient les cosmologistes pour formuler et tester leurs hypothèses. Les grands projets militaro-scientifiques mis en place par les nations en guerre, comme le projet Manhattan aux États-Unis et le projet Radar au Royaume-Uni, permirent de développer de la physique nucléaire et de la radioastronomie, deux disciplines qui prirent par la suite une place importante dans les controverses en cosmologie. C'est aussi au sein de ces projets que les scientifiques d'une nouvelle génération purent se rencontrer et partager leur intérêt commun pour la cosmologie.

À la fin des années 1940 deux nouvelles théories de l'Univers virent le jour : la théorie de la nucléosynthèse développée par George Gamow (1904–1968), Ralph Alpher (1921–2007) et Robert Herman (1914–1997) aux États-Unis ; et la théorie de l'état stationnaire, proposée par trois jeunes physiciens de Cambridge, Fred Hoyle (1915–2001), Hermann Bondi (1919–2005) et Thomas Gold (1920–2004). Ces deux théories, dont les hypothèses fondamentales sont incompatibles (voir figure 4.1 pour une

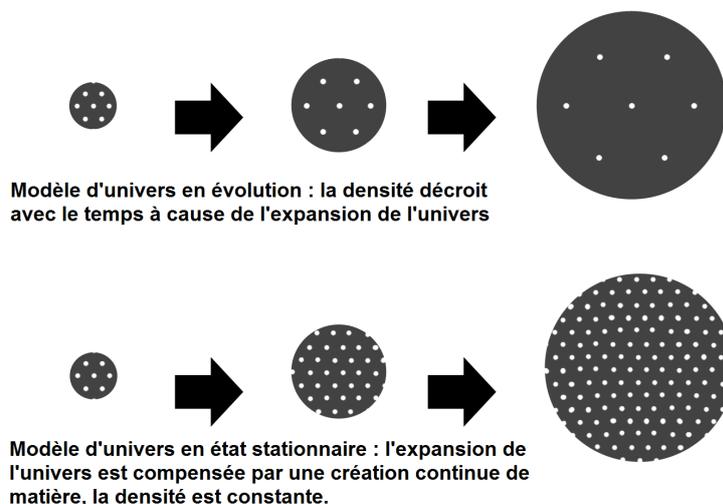


FIGURE 4.1 : La théorie de la nucléosynthèse primordiale présuppose un modèle d'Univers en évolution (en haut). La théorie de l'état stationnaire fait l'hypothèse d'un Univers en expansion mais stationnaire (en bas).

illustration), rivalisèrent jusqu'à la fin des années 1960 :

- La théorie de la nucléosynthèse primordiale repose sur l'hypothèse selon laquelle l'Univers a connu dans son passé un état dense et chaud dans lequel ont eu lieu les réactions thermonucléaires à l'origine des abondances en éléments chimiques observées aujourd'hui dans l'Univers¹.
- La théorie de l'état stationnaire suppose, à l'inverse, un modèle d'Univers qui, bien qu'en expansion, présente toujours le même aspect et a une densité constante au cours du temps grâce à une création continue de matière.

Ces deux théories menèrent à des prédictions différentes dont la plus connue est celle que firent Alpher et Herman en 1948 : l'état dense et chaud de l'Univers jeune a dû émettre un rayonnement refroidi par l'ex-

¹C'est cet état de l'Univers qui fut ironiquement surnommé « big bang » par Fred Hoyle au cours d'une série d'émissions radiophoniques de vulgarisation en 1950. Dans ce chapitre, j'emploie le terme « théorie du big bang » pour désigner *tous* les modèles d'Univers décrivant une phase chaude et dense de nucléosynthèse.

pansion de l'Univers et qui nous parviendrait aujourd'hui avec une température de quelques kelvins².

D'après une conception classique de l'histoire de la cosmologie³, cette prédiction aurait été confirmée par la découverte, en 1965, du premier rayonnement émis par l'Univers par deux ingénieurs des laboratoires Bell, Arno Penzias et Robert Wilson. Cette conception de l'histoire de la cosmologie donne aux prédictions un rôle décisif dans les progrès de notre connaissance de l'Univers, puisque ce serait suite à la prédiction et à la découverte du fond diffus cosmologique qu'aurait été établie la théorie du big bang.

L'objectif de ce chapitre est de questionner cette conception classique de l'histoire de la cosmologie pour examiner en détail l'importance des prédictions dans la révolution scientifique qui aboutit au paradigme du big bang. La première section de ce chapitre décrit la théorie de la nucléosynthèse primordiale et de l'état stationnaire, ainsi que leurs prédictions respectives. La deuxième section montre comment la capacité prédictive de chacune de ces théories s'est développée dans les années 1950 et 1960. Enfin, la dernière section analyse la notion de « prédiction féconde » pour rendre compte du rôle historique joué par les prédictions dans cette période de l'histoire de la cosmologie.

4.1 Deux théories et leurs prédictions

Pour la cosmologie, 1948 est une *annus mirabilis*. Non seulement les deux théories de la nucléosynthèse primordiale et de l'état stationnaire virent le jour indépendamment l'une de l'autre aux États-Unis et au Royaume-Uni, mais en plus leurs auteurs en tirèrent rapidement de nouvelles prédictions observables.

²Puisque ce rayonnement « fossile » a été émis par l'Univers tout entier, il doit donc nous parvenir de l'Univers tout entier et donc de toutes les directions de l'espace – c'est un rayonnement *isotrope*. C'est pour cette raison qu'il fut longtemps appelé « température du ciel », même si on lui préfère aujourd'hui l'appellation de « fond diffus cosmologique » ou de « *cosmic microwave background* » pour souligner son origine cosmologique, à la différence du rayonnement des étoiles qui contribue lui aussi – en une bien moindre mesure – à la température du milieu interstellaire.

³Voir par exemple LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 17.

De la fin de la Seconde Guerre mondiale jusqu'aux années 1970, la cosmologie est la scène de nombreux débats, notamment sur la valeur de la constante de Hubble, sur la distance des sources radio lointaines et intenses (aujourd'hui appelées « quasars » pour « *quasi-stellar objects* ») et sur l'origine des rayons cosmiques. La controverse entre la théorie de la nucléosynthèse primordiale et celle de l'état stationnaire qui nous intéresse ici fut reliée, de près ou de loin, à tous ces débats. Elle représente, selon la conception classique de l'histoire de la cosmologie, un cas clair où l'affrontement entre deux théories opposées fut tranché par la confirmation des prédictions de l'une (la théorie de la nucléosynthèse primordiale) et la réfutation des prédictions de l'autre (la théorie de l'état stationnaire).

Cette conception apparaît souvent dans les manuels d'histoire des sciences et dans les travaux de certains historiens des sciences. Ainsi, l'historien Stephen Brush a consacré une étude détaillée à la découverte du fond diffus cosmologique qui aurait été prédite par la théorie de la nucléosynthèse primordiale⁴. S. Brush a produit de nombreuses études sur certains épisodes précis d'histoire des sciences⁵ pour déterminer si « la confirmation d'une prédiction faite *avant* que le fait empirique ne soit connu est une preuve plus convaincante en faveur d'une théorie que l'*explication* de faits déjà connus »⁶, thèse qu'il attribue à Popper et qu'il nomme « principe de Popper »⁷.

Le cas de la prédiction du fond diffus cosmologique par la théorie de la nucléosynthèse primordiale semble illustrer ce principe et montrer l'importance des prédictions nouvelles. Mais pour S. Brush, si les partisans de la théorie de l'état stationnaire ont été convaincus d'abandonner

⁴Stephen BRUSH, "Prediction and theory evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang.", *Perspectives on science* (1993).

⁵Voir, entre autres : Stephen BRUSH, "Prediction and Theory Evaluation : The Case of Light Bending", *Science* 246.4934 (1989), p. 1124–1129, Stephen BRUSH, "Prediction and theory evaluation in physics and astronomy", *No truth except in the details*, Boston, Kluwer, 1995, p. 299–318, Stephen BRUSH, "Dynamics of theory change in chemistry", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 30.1 (1999), p. 21–79, Stephen BRUSH, "Predictivism and the periodic table", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 38.1 (2007), p. 256–259.

⁶BRUSH, "Prediction and theory evaluation in physics and astronomy", p. 299.

⁷Je reviens plus loin sur cette appellation à laquelle je ne souscris pas.

leur théorie après la découverte du fond diffus cosmologique, c'est parce que « deux des fondateurs de la théorie de l'état stationnaire avaient proclamé haut et fort leur adhésion au principe de Popper »⁸.

Dans ce chapitre, je réexamine la controverse entre la théorie de la nucléosynthèse primordiale et la théorie de l'état stationnaire à partir des recherches extrêmement détaillées de l'historien de la cosmologie H. Kragh⁹. Je m'appuie aussi sur les témoignages de cosmologistes et astronomes recueillis à la fin des années 1980 par Alan Lightman, professeur de physique au MIT et Roberta Brawer, docteure en histoire des sciences au MIT¹⁰. Je soutiens que si l'on ne peut se focaliser sur la seule prédiction du fond diffus cosmologique pour comprendre l'évolution de la cosmologie pendant les années 1950 et 1960, si l'on prend en considération l'ensemble des prédictions réalisées aussi bien par la théorie de l'état stationnaire que par celle de la nucléosynthèse primordiale, on s'aperçoit alors que les prédictions ont effectivement joué un rôle crucial dans la transformation de la cosmologie en une science mature et intégrée aux autres branches de la physique et de l'astronomie — notamment la physique nucléaire et la radioastronomie.

4.1.1 La théorie de la nucléosynthèse primordiale et ses prédictions

Les fondements de la théorie de la nucléosynthèse primordiale sont formulés dans un article de 1948 intitulé « The Origin of Chemical Elements »¹¹. Ses auteurs étaient Gamow et son doctorant de l'Université de Washington, Alpher¹².

⁸BRUSH, "Prediction and theory evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang.", p. 565.

⁹KRAGH, *Cosmology and Controversy*.

¹⁰LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*. L'ouvrage dans lequel sont présentés ces témoignages est précédé d'une courte histoire de la cosmologie qui illustre bien la « conception classique » de l'histoire de la cosmologie, laquelle rejoint en de nombreux points la conception de S. Brush.

¹¹George GAMOW, Ralph ALPHER et Hans BETHE, "The Origin of chemical elements", *Physical Review, Letters* 73.7 (1948), p. 802–803.

¹²Le troisième auteur crédité, Hans Bethe (1906-2005), physicien nucléaire à la tête de la division scientifique du projet Manhattan, qui a contribué aux recherches sur la nucléosynthèse stellaire (au cœur des étoiles) n'a été ajouté que parce que Gamow

Dans cet article, Gamow et Alpher décrivent un Univers primordial constitué d'un gaz de neutrons hautement comprimé (que Gamow nommait l'*Ylem*), neutrons se décomposant en protons et électrons lorsque l'expansion a suffisamment fait chuter la pression. Tant que la température est assez importante pour qu'il y ait des réactions de fusion nucléaire, ces particules se combinent pour créer les noyaux des premiers éléments chimiques de la classification périodique des éléments de Mendeleïev : c'est la nucléosynthèse dite *primordiale*, par opposition à la nucléosynthèse *stellaire* qui a lieu au sein des étoiles. La nucléosynthèse primordiale prend fin lorsque la pression n'est plus suffisante pour atteindre les températures nécessaires à la fusion nucléaire.

Puisqu'un élément chimique est produit par la fusion d'éléments plus légers lors d'une réaction de fusion nucléaire, l'équation différentielle au fondement de la théorie de la nucléosynthèse primordiale permet de relier le taux de production d'un élément de poids atomique donné, au nombre relatif de cet élément et de l'élément de poids inférieur pendant cette phase de nucléosynthèse. En comparant les abondances relatives de chaque élément chimique de l'Univers, on peut donc estimer combien de temps a duré la phase de nucléosynthèse primordiale et la densité de l'Univers pendant cette période de son histoire.

Ces résultats intéressèrent la communauté des physiciens et notamment les physiciens nucléaires : en utilisant des données d'observation connues et précises (les abondances relatives des éléments chimiques), la théorie de la nucléosynthèse permettait d'estimer certaines valeurs des paramètres cosmologiques de l'Univers primordial, comme sa densité et son volume. Celui-ci devenait ainsi accessible à une théorisation quantitative. Cependant, dans cette première formulation de la théorie de la nucléosynthèse primordiale, on ne trouve aucune prédiction d'une grandeur mesurable par des moyens astronomiques comme la « température du ciel », c'est-à-dire la température du rayonnement émis par l'Univers primordial.

Cette prédiction n'apparaît que sept mois plus tard dans un article

souhaitait que les initiales des auteurs soit α, β, γ .

d'Alpher et Herman¹³ intitulé « The Evolution of the Universe », paru le 13 novembre 1948 dans les pages de *Nature* et destiné à rectifier certaines erreurs d'un article de Gamow¹⁴. :

La température de ce gaz à l'époque de la condensation était de 600° K [*sic*] et l'on trouve une température dans l'Univers présent d'environ 5° K [*sic*].

Nous avons l'espoir de publier le détail de ces calculs dans un proche futur.¹⁵

Dans ce passage apparaît, pour la première fois, l'idée de calculer la température du « gaz cosmologique », c'est-à-dire de l'Univers primordial. Il s'agit bien là d'une prédiction nouvelle d'une grandeur *observable*, qui peut être fixée indépendamment par la théorie *et* par la mesure. Mais les détails de ce calcul ne furent présentés dans aucune publication future, malgré le souhait des auteurs. Cela témoigne du peu d'intérêt qui fut porté à cette prédiction de la théorie de la nucléosynthèse primordiale jusqu'à la découverte du fond diffus cosmologique en 1965. Le succès et la réputation de la théorie de la nucléosynthèse primordiale tint essentiellement à sa capacité à *expliquer* les abondances des éléments chimiques par un mécanisme de fusion nucléaire et à faire des prédictions de grandeurs *théoriques* comme la densité et la température de l'Univers primordial.

¹³Herman peut être considéré comme le troisième fondateur de la théorie de la nucléosynthèse primordiale puisque même s'il n'apparaît pas comme auteur de l'article « The Origin of Chemical Elements », il en fut un inspirateur certain : Gamow lui proposa même de changer son nom en « Delter » afin que l'article soit connu comme $\alpha, \beta, \gamma, \delta$. Il accompagna Alpher durant son travail de thèse et collabora longtemps avec lui par la suite.

¹⁴Sous le même titre « The Evolution of the Universe », Gamow fit paraître dans *Nature* le 30 octobre 1948 un article de trois pages reprenant l'équation fondamentale de la nucléosynthèse primordiale pour explorer les conditions de l'Univers primordial, déterminer le rapport entre l'abondance des protons et des neutrons et étudier le problème de la formation des galaxies. Cependant, contrairement à ce que l'on trouve dans de nombreuses bibliographies de Gamow et d'histoire de la cosmologie, aucune mention n'est faite dans cet article des restes du rayonnement de cet Univers primordial et sa température actuelle n'est pas calculée. Voir George GAMOW, "The Evolution of the universe", *Nature* 162.4122 (1948), p. 680–682.

¹⁵Ralph ALPHER et Robert HERMAN, "Evolution of the universe", *Nature* 162 (1948), p. 774–775, p. 775.

4.1.2 La théorie de l'état stationnaire et ses prédictions

Les trois physiciens qui ont développé la théorie de l'état stationnaire étaient des amis proches travaillant et vivant à Cambridge. Ils s'étaient rencontrés au cours de leurs recherches sur le projet britannique Radar pendant la Seconde Guerre mondiale.

Hoyle était un physicien britannique, spécialisé à l'origine en mécanique quantique, qui se tourna vers l'astrophysique dans les années 1940 et travailla notamment sur la nucléosynthèse dans les supernovae. Bondi, sujet britannique d'origine autrichienne, était spécialisé dans l'étude de la relativité générale, qu'il étudia à partir de 1937 sous la direction d'Eddington. Thomas Gold était également un Britannique d'origine autrichienne et il rencontra Bondi dans un camp canadien où ils furent envoyés au début de la guerre à cause de leur origine germanique. Ce serait lui qui aurait, le premier, formulé l'idée qu'une création continue de matière peut contrebalancer l'expansion de l'Univers et ainsi assurer que la densité de l'Univers reste constante au cours du temps.

Cette hypothèse d'une création continue de matière est l'hypothèse fondamentale de la théorie de l'état stationnaire parce qu'elle assure que l'Univers conserve la même densité et donc le même aspect au cours de son évolution. Elle s'oppose directement à la théorie de la nucléosynthèse primordiale, laquelle n'a de sens que si l'Univers a été plus dense et plus chaud dans le passé.

Mais même si les trois physiciens de Cambridge partageaient la même hypothèse fondamentale, ils publièrent deux articles en 1948 qui exposaient chacun une formulation différente de la théorie de l'état stationnaire.

Dans son article « A new model for the expanding Universe »¹⁶, Hoyle présente une théorie de l'état stationnaire conçue comme une extension de la théorie de la relativité générale. En effet, sa théorie repose sur une modification de l'équation d'Einstein à laquelle il a ajouté un *tenseur de*

¹⁶Fred HOYLE, "A new model for the expanding universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108 (août 1948), p. 372.

création C ¹⁷.

À l'inverse, dans leur article « The steady state theory of the expanding Universe », Bondi et Gold critiquent l'application pure et simple de la théorie de la relativité générale à l'Univers et proposent une théorie qui repose sur le principe selon lequel non seulement l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle (ce que l'on appelle le principe cosmologique) mais aussi inchangé au cours du temps :

Notre travail n'est donc pas défini uniquement par le principe cosmologique usuel, mais par une extension de celui-ci qui est obtenu en supposant que l'Univers n'est pas seulement homogène mais aussi inchangé à grande échelle. Cette combinaison du principe cosmologique et du postulat stationnaire, nous l'appelons le *principe cosmologique parfait* et tous nos arguments s'appuieront dessus¹⁸.

Ainsi, si l'article de Hoyle compte 48 équations en 10 pages, celui de Bondi et Gold n'en compte que 7 sur 18 pages, car il se présente comme une série de déductions à partir de cette hypothèse du principe cosmologique parfait.

La formulation de la théorie de l'état stationnaire par Bondi et Gold est authentiquement différente de celle de Hoyle, puisque leurs hypothèses fondamentales sont différentes. Cependant, elles représentent un des rares cas de théories empiriquement équivalentes ayant réellement existé dans l'histoire des sciences, parce que le principe cosmologique parfait peut être déduit des équations de Hoyle si le tenseur de création de matière est fixé de manière à ce que cette création équilibre parfaitement l'expansion de l'Univers. Dans ce cas, toute prédiction pouvant être réalisée à partir de la théorie de Bondi et Gold fondée sur le principe cosmologique parfait peut aussi l'être à partir de la théorie de Hoyle¹⁹.

¹⁷Voir l'annexe au chapitre 4 pour les détails de la formulation mathématique de la théorie de Hoyle.

¹⁸Hermann BONDI et Thomas GOLD, "The steady-state theory of the expanding universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108 (juillet 1948), p. 252, p. 254.

¹⁹La différence entre ces deux théories n'est donc pas dans leur contenu empirique, mais dans leur capacité à évoluer. La théorie de Hoyle étant, en partie, compatible

Bondi et Gold furent les premiers à formuler, dans leur article, des prédictions tirées de la théorie de l'état stationnaire :

1. *La courbure de l'Univers est nulle* : le principe cosmologique implique que le taux de création de matière soit constant (voir l'annexe au chapitre 4 pour une démonstration).
2. *L'Univers doit être en expansion* : si l'Univers est statique et satisfait le principe cosmologique parfait, il aurait déjà atteint l'équilibre thermodynamique. Or ce n'est pas le cas et le principe cosmologique parfait ne permet que deux types de mouvement de l'Univers : l'expansion régulière et son inverse, la contraction régulière. Dans un Univers en contraction il y aurait plus de radiations que dans un Univers statique, ce qui n'est pas le cas dans notre Univers, donc l'Univers est en expansion régulière. Puisque cette expansion est régulière, les galaxies doivent avoir une vitesse radiale proportionnelle à leur distance : c'est la loi de Slipher-Hubble (voir chapitre précédent).
3. *Les galaxies lointaines et proches ne doivent pas présenter de différences systématiques d'âge et d'aspect* : dans un modèle d'Univers en évolution, les galaxies lointaines doivent aussi être en moyenne plus jeunes, ce qui ne serait pas le cas dans un modèle d'Univers en état stationnaire. Donc tous les objets lointains, comme les galaxies, doivent avoir le même aspect que ceux qui sont plus proches de nous.

Parmi ces trois prédictions, la première est strictement théorique car la courbure de l'Univers n'est pas, à l'époque, une grandeur que l'on peut fixer indépendamment par la mesure et la théorie. En revanche, la

avec la théorie de la relativité générale, elle est capable d'attirer à elle des chercheurs intéressés par la théorie de la gravitation d'Einstein. De plus, puisque le tenseur de création de matière n'est pas forcément fixé pour équilibrer parfaitement l'expansion de l'Univers, la théorie de Hoyle peut aussi produire des modèles d'Univers « quasi-stationnaire ». C'est cette théorie de l'état quasi-stationnaire que Hoyle a soutenue après la découverte du fond diffus cosmologique. On voit donc avec cet exemple d'équivalence empirique que même si deux théories font, à un instant donné de l'histoire des sciences, des prédictions semblables, l'une peut quand même être préférable à l'autre parce qu'elle offre des perspectives d'évolution différentes.

deuxième prédiction est bien une prédiction de grandeur observable : c'est le rapport proportionnel entre la distance et le décalage spectral des galaxies. Enfin, la troisième, bien que formulée de manière non-quantitative et vague, est aussi une prédiction qui peut être testée par des mesures réalisées en observatoire par des astronomes. Il suffit en effet pour la tester de compter des galaxies ou tout autre objet lointain et de comparer leur nombre en fonction de leur distance. Puisque la théorie de l'état stationnaire prédit que la densité de l'Univers doit être la même quel que soit son âge, on doit trouver autant de ces objets dans l'Univers lointain que dans l'Univers proche.

4.1.3 Pouvoir prédictif et capacité prédictive

Si l'on se contente de cette description des théories de la nucléosynthèse primordiale et de l'état stationnaire et que l'on passe immédiatement à la découverte du fond diffus cosmologique en 1965, on peut alors avoir l'impression, comme S. Brush, que l'histoire de la controverse entre ces deux théories est celle de la réfutation de l'une et de la confirmation de l'autre lors de la découverte du fond diffus cosmologique, qui aurait servi d'*experimentum crucis* pour départager les prédictions de ces deux théories.

Cependant, ces prédictions réalisées en 1948 n'ont pas eu beaucoup d'écho dans la communauté des cosmologistes ni dans celles des astronomes et des physiciens et n'ont pas influencé sensiblement le développement des connaissances sur l'Univers entre 1948 et 1965. Comme le remarque S. Brush lui-même²⁰, la prédiction de la température du ciel d'Alpher et Herman tomba dans l'oubli dès 1955. Quant à la prédiction de la théorie de l'état stationnaire selon laquelle les objets lointains (donc âgés) doivent avoir le même aspect que ceux proches (donc récents) elle se heurte à la fin des années 1940 à un problème de taille : mêmes les plus grands télescopes optiques de l'époque, ceux du Mont Palomar aux États-Unis avec lesquels avait travaillé Hubble, ne sont pas assez puissants pour pouvoir sonder l'Univers suffisamment loin.

²⁰BRUSH, "Prediction and theory evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang.", p. 578.

Cependant, ces prédictions ont effectivement montré dès 1948 que les deux théories en présence étaient dotées d'un *pouvoir prédictif*, mais elles ne permettaient pas d'évaluer réellement leur *capacité prédictive* respective. Comme on l'a vu dans l'introduction de cette thèse, on peut distinguer le *pouvoir prédictif* qui est la possibilité d'utiliser une hypothèse, une théorie ou un modèle pour en tirer ne serait-ce qu'une prédiction — de grandeur théorique ou observable — de la *capacité prédictive* qui est la mesure du nombre, de la variété et de la précision des prédictions dans lesquelles une hypothèse, une théorie ou un modèle est impliqué.

Cette distinction a une conséquence importante. On peut juger *en principe* du pouvoir prédictif d'une théorie, en examinant s'il est possible de l'utiliser pour fixer la valeur d'une grandeur sans la mesurer, même s'il est impossible *en pratique* de réaliser cette prédiction ou de la tester, faute de moyens techniques par exemple. En revanche, on ne peut juger de la capacité prédictive d'une théorie qu'*en pratique*, c'est-à-dire en examinant les prédictions que l'on peut *réellement* dériver de cette théorie et tester. En effet, il est impossible de mesurer *à l'avance* la diversité et la précision des prédictions d'une théorie avant que celles-ci ne soient effectivement réalisées et soumises à des tests empiriques. C'est précisément le travail des scientifiques eux-mêmes que de mener à bien ces processus prédictifs et de les tester : et tant qu'ils n'ont pas accompli ce travail, il est toujours très hasardeux de jauger d'un point de vue philosophique la capacité prédictive d'une théorie (voir chapitre 7, section 7.3.4).

Prenons l'exemple de la théorie de la gravitation de Newton pour illustrer cette distinction entre pouvoir prédictif et capacité prédictive. On peut affirmer sans faire aucun calcul ni expérience que l'hypothèse selon laquelle il existe une force d'attraction universelle par laquelle les corps s'attirent mutuellement, qui est proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de leur distance, dispose d'un pouvoir prédictif. Il suffit de remarquer que si cette hypothèse est conjuguée à la troisième loi de Newton (selon laquelle la force exercée sur un corps est proportionnelle à son accélération) elle permet de fixer la valeur de l'accélération d'un corps en chute libre (c'est-à-dire soumis

uniquement à cette force d'attraction). On peut donc dire, avant même de prédire un phénomène inconnu ou une occurrence future d'un phénomène connu, que cette hypothèse a un pouvoir prédictif.

Cependant, tant que l'on n'a pas les moyens de réaliser en pratique le calcul de l'accélération d'un corps en chute libre, par exemple d'une planète autour du Soleil, ni de comparer cette prédiction à des mesures réalisées indépendamment de la théorie, alors on ne peut mesurer si l'hypothèse de l'attraction universelle a peu ou beaucoup de capacité prédictive. Or, pour pouvoir mener à bien une telle prédiction, il faut disposer de certains outils mathématiques — le calcul infinitésimal — et techniques — des lunettes et des télescopes suffisamment précis pour pouvoir discriminer la prédiction de la théorie de Newton des autres théories concurrentes. Ainsi, la capacité prédictive de l'hypothèse de l'attraction universelle s'est accrue au fur et à mesure que les astronomes et les mathématiciens réussissaient à l'appliquer à de nouveaux objets. Les recherches géométriques d'Alexis Clairaut (1713-1765) par exemple, qui permirent d'appliquer la théorie de Newton à la Lune en 1752 et à la comète de Halley en 1759²¹, ont ainsi fait s'accroître la capacité prédictive de l'hypothèse de l'attraction universelle. De même, les recherches astronomiques sur les étoiles binaires que menèrent Caroline (1750-1848) et William Herschel (1738-1822), grâce à leur télescope de 1,2 mètre de diamètre, permirent de montrer en 1802 que la théorie de Newton s'appliquait aussi à des objets en dehors du système solaire et augmentèrent de ce fait la capacité prédictive de cette théorie.

Par conséquent, puisque l'on ne peut évaluer la capacité prédictive d'une théorie qu'en examinant les prédictions que l'on peut faire et tester *en pratique*, la capacité prédictive est dépendante du contexte scientifique et technique de cette théorie et doit être évaluée à partir de ce contexte. C'est cette contextualisation qui est oubliée par les travaux de S. Brush et d'autres philosophes des sciences qui n'étudient que des épisodes de succès prédictifs particuliers sans les replacer dans le temps long du développement de la capacité prédictive des théories qui ont connu ces succès.

²¹J'examine en détail les prédictions de Clairaut dans le chapitre 7, section 7.5.

Si l'on examine la controverse entre les théories de l'état stationnaire et de la nucléosynthèse primordiale à la lumière de la distinction entre capacité prédictive et pouvoir prédictif, on peut dire qu'en 1948 les partisans de ces deux théories avaient prouvé le pouvoir prédictif de leurs théories. Mais celles-ci disposaient de peu de capacité prédictive, puisque les prédictions que l'on pouvait en tirer étaient à peine esquissées ou impossibles à tester avec les moyens d'observation disponibles.

Cette situation évolua rapidement au cours des années 1950 et 1960 et les efforts des partisans de ces théories, conjugués à l'apparition de nouvelles techniques d'observation comme la radioastronomie, permirent le développement de la capacité prédictive de ces théories. C'est ce développement qu'il est essentiel d'analyser pour comprendre comment s'est résolue la confrontation entre ces deux théories et quelles ont été les évolutions de la cosmologie au cours de cette période.

4.2 Le développement de la capacité prédictive de la cosmologie au cours des années 1950-1960

Les controverses cosmologiques dans les années 1950 et 1960 n'opposèrent pas tant les partisans de la théorie de la nucléosynthèse primordiale à ceux de la théorie de l'état stationnaire que chacune de ces théories à leurs détracteurs respectifs. Les critiques dont ces deux théories furent l'objet amenèrent leurs défenseurs à développer différemment la capacité prédictive de leur théorie.

4.2.1 Critiques scientifiques et épistémologiques

Les critiques adressées à chacune des théories ne sont pas de même nature. La théorie de la nucléosynthèse primordiale dut affronter, pendant les années 1950, trois objections scientifiques :

- La théorie de la nucléosynthèse primordiale affrontait un problème important, commun à tous les modèles d'Univers en évolution (mais

pas à la théorie de l'état stationnaire) : celui de l'échelle temporelle (*time-scale problem*). L'âge de l'Univers étant inversement proportionnel à la constante de Hubble H (voir l'annexe du chapitre 3), plus celle-ci est grande, plus l'Univers est jeune. Or, avant d'être réévaluée par l'astronome Walter Baade (1893-1960) au milieu des années 1950, la constante de Hubble était estimée à environ $500 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$, ce qui indiquait un âge de l'Univers de quelques milliards d'années. Ce résultat était en contradiction avec l'âge de la Terre mesuré par la radioactivité de ses roches (environ 5 milliards d'années). La théorie de l'état stationnaire, qui décrit un Univers sans commencement, ne rencontre pas ce problème.

- Un problème spécifique à la théorie de la nucléosynthèse était celui de l'abondance de certains poids atomiques. La nucléosynthèse décrite par la théorie de Gamow, Alpher et Herman s'arrête avant de pouvoir construire des atomes plus lourds que le Lithium, laissant la charge à la nucléosynthèse stellaire de prendre le relais pour ceux-ci. Or, le mécanisme de la synthèse stellaire n'était pas théorisé à cette époque. La théorie de la nucléosynthèse primordiale suppose ainsi l'existence, dès l'origine de l'Univers, des noyaux de poids atomiques 5 et 8, alors que l'Univers primordial est censé ne contenir que de l'hydrogène (poids atomique 1).
- Enfin, l'un des problèmes majeurs fut que les données d'observation étaient telles que pendant plusieurs années cette théorie semblait réaliser des prédictions peu réalistes. Ainsi, en 1951, en s'appuyant sur de nouvelles mesures de la densité de l'Univers, Alpher et Herman réévaluèrent leur prédiction de la température du ciel à 28 kelvins²². Or, à une telle température, le rayonnement cosmologique aurait déjà dû être repéré par les premiers radiotélescopes, ce qui discrédita cette prédiction.

Ces trois objections ont pour point commun de ne pas dépendre seulement de la théorie de la nucléosynthèse primordiale, mais des connais-

²²Ralph ALPHER et Robert HERMAN, "Neutron-capture theory of element formation in an expanding Universe", *Physical Review* 84.1 (1951), p. 60.

sances dans d'autres domaines : l'astronomie et la physique nucléaire. Même si ces objections furent progressivement levées entre 1955 et 1965, mais il fallut attendre le milieu des années 1960 pour que la plupart des physiciens et des astronomes soient convaincus que la théorie de la nucléosynthèse primordiale n'était pas incompatible avec les résultats d'autres sciences et était capable de fournir un cadre prédictif quantitativement précis pour leurs recherches.

À la différence de la théorie de la nucléosynthèse primordiale, la théorie de l'état stationnaire fut attaquée sur un terrain essentiellement épistémologique puisque c'est sa *scientificité* même qui a été critiquée. Les partisans de cette théorie ont donc cherché à montrer que l'hypothèse d'un état stationnaire menait bien à des prédictions empiriquement testables, ce qui les a poussés à développer sa capacité prédictive dès les années 1950.

En février 1953, Dingle, le président de la *Royal Astronomical Society* qui s'était déjà illustré dans les années 1930 par son opposition à la cosmologie de Milne (voir chapitre précédent), attaqua directement la théorie de l'état stationnaire lors de son adresse présidentielle annuelle, en l'accusant de n'être qu'un « romantisme non scientifique ». Ce discours fut considéré comme suffisamment important pour être publié dans *Science* en octobre 1954. En 1956, Dingle reprit ses trois principales critiques contre la théorie de l'état stationnaire dans un article publié dans *Scientific American* :

- Le principe cosmologique parfait n'est pas un *principe*, mais un outil, une supposition : « on doit appeler une bêche une bêche et non un Principe Agricole Parfait »²³.
- La théorie de l'état stationnaire repose sur un principe qui ne peut être discuté par l'expérience puisqu'elle a « précisément la même nature que les orbites circulaires et les cieux immuables »²⁴.
- La théorie de l'état stationnaire n'est pas scientifique puisqu'« au-

²³Herbert DINGLE, "On science and modern cosmology (Presidential address)", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 113 (1953), p. 393, p. 396.

²⁴DINGLE, "On science and modern cosmology (Presidential address)", p. 396.

cun énoncé sur l'Univers, la Nature ou l'expérience ne doit être affirmé sans preuve »²⁵.

Ainsi, les critiques contre la théorie de l'état stationnaire vinrent d'abord des scientifiques eux-mêmes et particulièrement des astronomes. Mais elles attaquaient cette théorie sur un terrain philosophique en contestant la scientificité de cette théorie et de son hypothèse fondamentale, le principe cosmologique parfait. Gerald Withrow (1912-2000), professeur de mathématiques à l'Imperial College et ancien collaborateur de Milne à Oxford, attaqua aussi la théorie de l'état stationnaire sur la base d'arguments philosophiques, dans le *British Journal for the Philosophy of Science* :

En cosmologie, les différences d'opinion sont bien plus profondes que dans les autres sciences. [...] Il faut admettre qu'il n'y a jusqu'à présent aucun signe en cosmologie de cet « accord universel » qui est la principale caractéristique d'une science²⁶.

C'est dans le contexte de ces critiques d'origine épistémologique qu'il faut comprendre l'adhésion des partisans de la théorie de l'état stationnaire à l'épistémologie de Popper relevée par S. Brush. Lorsque parut en 1959 la traduction anglaise du premier ouvrage majeur de Popper, *La Logique de la découverte scientifique*, publié 25 ans plus tôt en allemand, c'est Bondi et le mathématicien Clive Kilmister (1924-2010), ancien élève d'Eddington, qui se chargèrent de la recension de cet ouvrage dans le *British Journal for Philosophy of Science*²⁷. Cette recension fut l'occasion pour Bondi de mettre en avant ce qu'il considérait être les principaux aspects de la philosophie de Popper afin de les utiliser pour défendre sa théorie des attaques dont elle faisait l'objet.

²⁵Herbert DINGLE, "Cosmology and science", *Scientific American* 195 (1956), p. 224-240, p. 397.

²⁶Gerald WHITROW et Hermann BONDI, "Is physical cosmology a science?", *The British Journal for the Philosophy of Science* 4.16 (1954), p. 271-283.

²⁷Hermann BONDI et Clive KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", *The British Journal for the Philosophy of Science* 10.37 (1959), p. 55-57.

La première caractéristique de la philosophie des sciences de Popper que remarquent Bondi et Kilmister dans leur recension est que les hypothèses n'ont pas à être appuyées sur des observations et des expériences (« Il n'y a pas d'induction et il n'y a pas non plus de "problème de l'induction" »²⁸). La première raison est que les preuves empiriques ne sont pas des faits d'observations absolus²⁹ et la seconde est que ces preuves ne sont ni nécessaires ni suffisantes pour avancer une hypothèse. C'est ce qui leur permet de répondre aux critiques de Dingle, qui accusait les partisans de la théorie de l'état stationnaire de ne pas se conformer à la méthode inductive « d'Aristote et de Newton », en montrant que Popper affirme « l'énorme importance des spéculations métaphysiques pour l'avancée de la science »³⁰.

Mais si les *preuves* directes des hypothèses ne sont pas déterminantes, Bondi et Kilmister remarquent cependant que, pour Popper, les *tests* empiriques des hypothèses sont nécessaires pour que celles-ci puissent être considérées comme scientifiques et ils insistent sur le fait que « tout système scientifique peut être réfuté par l'expérience »³¹.

La principale demande que l'on peut faire à toute théorie scientifique est qu'elle corresponde aux faits et qu'elle prédise (ou prédise correctement) les résultats de nouvelles expériences ; la principale méthode de réfutation [*disproof*] de n'importe quelle théorie est qu'elle soit en désaccord avec les faits. [...] Il apparaît donc que le principal critère d'une science est l'approbation universelle de la possibilité d'une réfutation expérimentale et observationnelle. Réciproquement, aucune entreprise non-scientifique ne satisfait ce critère ³².

²⁸BONDI et KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", p. 55.

²⁹« La base empirique de la science n'a rien d' "absolue". [Popper] la compare à la structure d'un bâtiment sur pilotis dans un marais » BONDI et KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", p. 55.

³⁰BONDI et KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", p. 57.

³¹BONDI et KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", p. 56.

³²WHITROW et BONDI, "Is physical cosmology a science?", p. 278-279. Ce débat entre Bondi et Whitrow ayant eu lieu en 1954, soit 5 ans avant la traduction anglaise de la *Logique de la découverte scientifique*, il prouve que Bondi avait connaissance de la philosophie de Popper avant cette traduction. Il est probable qu'étant d'origine autrichienne, il ait eu accès au texte en langue originale et que l'épistémologie de

Cette réponse de Bondi à Withrow montre qu'il a une compréhension fine de la philosophie de Popper pour qui la réfutabilité n'est pas seulement un critère de démarcation entre science et métaphysique, mais aussi un moyen d'évaluer le contenu informatif d'une théorie : « ce que j'appelle le contenu empirique d'une théorie augmente avec son degré de réfutabilité : plus un énoncé interdit à des phénomènes de se produire, plus il en dit sur le monde »³³. Cet argument fut directement repris par Bondi non seulement pour soutenir la scientificité de la théorie de l'état stationnaire mais aussi pour montrer qu'il s'agit de la théorie cosmologique la plus fragile et donc de celle qui devrait intéresser le plus les scientifiques :

Car l'argument correct m'a toujours semblé être que la théorie de l'état stationnaire était celle qui pouvait être la plus facilement infirmée par l'observation. En conséquence, elle devrait être préférée à celles qui sont moins réfutables jusqu'à ce qu'elle soit infirmée³⁴.

Ces principales thèses de Popper que Bondi a mises en exergue dans sa recension de *La Logique de la découverte scientifique* eurent dès le départ une influence sur la formation et le développement de la théorie de l'état stationnaire. Dès leur premier article, Bondi et Gold s'appliquèrent à proposer une formulation de la théorie de l'état stationnaire qui permettait d'en tirer des conséquences observables en n'utilisant que très peu d'hypothèses auxiliaires, lesquelles rendraient la théorie moins réfutable, puisqu'en cas d'infirmité des prédictions on pourrait rejeter la faute sur l'une de ces hypothèses auxiliaires. Ainsi, l'approche qualitative et spéculative de la version de la théorie de l'état stationnaire de Bondi et Gold ne fut probablement pas motivée par un goût pour l'abstraction et une aversion pour les mathématiques (Bondi était connu pour être un mathématicien hors pair), mais plutôt par une volonté de proposer un modèle d'Univers stationnaire fécond en prédictions qui pourraient réfuter les hypothèses fondamentales de la théorie.

Popper ait déjà influencé sa formulation de la théorie de l'état stationnaire (c'est ce que soutient l'historien H. Kragh : voir KRAGH, *Cosmology and Controversy*, p. 245).

³³KARL POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, Londres, 1959, p. 103.

³⁴BONDI et KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", p. 56.

Mais si Bondi est celui qui a le plus combattu sur le terrain épistémologique, il ne fut pas le seul à être inspiré par une conception popperienne de la science. Hoyle n'hésita pas non plus, dans *The Nature of the Universe*, à attaquer la théorie de la nucléosynthèse primordiale, en insistant sur la difficulté à la réfuter :

Je ne vois aucune raison de préférer l'idée d'un big bang. Il me semble qu'il s'agit en réalité d'une notion très peu satisfaisante, en un sens philosophique, car elle place son hypothèse principale hors de vue, là où elle ne peut jamais être *défiée* par aucun appel direct à l'observation³⁵.

Le terme « défié » indique que pour Hoyle, le problème de la théorie du « big bang » était qu'elle refusait de prendre le risque d'être réfutée par des observations, parce qu'il lui semblait impossible de pouvoir observer directement la nucléosynthèse primordiale. Il est donc probable que la collaboration entre Hoyle et Bondi ait donné à son approche de la méthodologie scientifique une saveur popperienne qui a influencé sa conception de la théorie de l'état stationnaire.

Ainsi, il semblerait que les fondateurs de la théorie de l'état stationnaire aient bien été des « poppériens » comme le soutient S. Brush. Cependant, aucun document n'indique qu'ils aient abandonné leur théorie en raison de leurs inclinations épistémologiques³⁶. L'influence de Popper sur Bondi, Gold et Hoyle est surtout patente dans leurs tentatives pour dériver de nombreuses prédictions de leur théorie et c'est pourquoi le développement de la capacité prédictive de la théorie de l'état stationnaire fut plus important que celle de la théorie de la nucléosynthèse primordiale pendant les années 1950.

³⁵Je souligne. Ce passage contient la première occurrence de l'expression « big bang ».

³⁶Pour les raisons qui expliquent cet abandon, voir la dernière section de ce chapitre.

4.2.2 Le développement de la théorie de l'état stationnaire dans les années 1950

Bondi et Hoyle ont mis en avant le fait que la théorie de l'état stationnaire était plus facilement réfutable que les modèles d'Univers en évolution parce qu'il suffisait d'une seule preuve que l'Univers jeune – c'est-à-dire les objets lointains – présente des différences systématiques avec l'Univers actuel – c'est-à-dire les objets plus proches – pour que cette théorie soit réfutée. Cette attitude les mena à détailler les prédictions de la théorie de l'état stationnaire, en cherchant d'abord des tests dans le domaine de l'astronomie optique.

Cosmologie et astronomie optique

Ainsi, dans un article de 1961³⁷, l'astronome Allan Sandage (1926-2010), observateur au Mont Palomar, récapitula les quatre types d'observation possibles en astronomie optique qui furent mis en œuvre dans la décennie précédente pour faire le tri parmi les différents modèles cosmologiques :

1. Test de la relation de Slipher-Hubble sur objets lointains ayant un décalage spectral vers le rouge important pour vérifier que l'expansion de l'Univers est la même aujourd'hui que par le passé.
2. Comptage des galaxies pour vérifier que leur densité n'a pas varié avec le temps.
3. Observation des diamètres angulaires d'objets lointains pour vérifier qu'ils sont de même dimension que les objets proches.
4. Mesure de la constante de Hubble pour vérifier que l'expansion de l'Univers est uniforme.

Ces tests cosmologiques n'auraient probablement pas été réalisés sans l'espoir de réfuter la théorie de l'état stationnaire. Les tests 2. et 3. sont directement inspirés de la prédiction de Bondi et Gold selon laquelle les objets lointains doivent avoir le même aspect que les objets proches. Si

³⁷Allan SANDAGE, "The Ability of the 200-INCH Telescope to Discriminate Between Selected World Models.", *The Astrophysical Journal* 133 (1961), p. 355–371.

les tests 2. et 3. avaient montré que le nombre et/ou l'aspect des galaxies avait significativement évolué au cours du temps, ils auraient réfuté une prédiction directe du principe cosmologique parfait. Mais ils n'auraient permis ni de réfuter ni de confirmer la théorie de la nucléosynthèse primordiale, puisque l'on aurait toujours pu modifier cette théorie pour l'ajuster à ces observations (par exemple en modifiant le paramètre de courbure ou l'âge de l'Univers). Ces observations cosmologiques en astronomie optique ont donc bien été motivées par la volonté de tester la théorie de l'état stationnaire. Les tests 1. et 4., qui reposent sur la loi de Hubble, furent eux aussi directement inspirés de la théorie de l'état stationnaire. En effet, si la constante de Hubble n'est pas la même pour des objets lointains, c'est que l'expansion de l'Univers a accéléré ou décéléré au cours de son histoire — ce qui irait à nouveau à l'encontre du principe cosmologique parfait de l'état stationnaire. L'idée d'utiliser le paramètre de décélération de l'expansion de l'Univers (noté q_0) pour tester les différents modèles cosmologiques trouve son origine dans un travail commun de Hoyle et Sandage publié cinq ans plus tôt³⁸ dans lequel Hoyle montre que pour la théorie de l'état stationnaire $q_0 = -1$ ³⁹. Ce calcul du paramètre de décélération n'aurait pas pu jouer le rôle de test de la théorie de la nucléosynthèse primordiale qui ne faisait aucune prédiction précise concernant le taux d'expansion de l'Univers.

La volonté de mettre la théorie de l'état stationnaire à l'épreuve a donc poussé ses partisans à en tirer de nouvelles prédictions de grandeurs mesurables par l'astronomie optique. Cependant, ces quatre tests supposent de sonder l'Univers à des distances importantes et par conséquent de rechercher des objets peu lumineux, ce qui était difficilement faisable en optique dans les années 1950. C'est dans le domaine de Gamow, Alpher et Herman, celui de la nucléosynthèse, que la théorie de l'état stationnaire fit le plus preuve de sa fécondité.

³⁸Fred HOYLE et Allan SANDAGE, "The second-order term in the redshift-magnitude relation", *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (1956), p. 301–307.

³⁹Voir l'annexe au chapitre 4 pour les détails de cette prédiction.

Cosmologie et nucléosynthèse stellaire des métaux

Hoyle, en 1953 et 1956, fut invité à CalTech par Gamow, avec qui il avait toujours entretenu de bonnes relations malgré leurs divergences en cosmologie. Il rencontra plusieurs physiciens intéressés par les problèmes liés à la nucléosynthèse. Avec les époux Burbidge et William Fowler (1911-1995), il publia en 1957 une théorie connue sous le sigle de B²HF qui décrit les mécanismes de fusion nucléaire au sein des étoiles et qui permet de prédire les abondances d'isotopes dans l'Univers de tous les éléments plus lourd que l'hélium jusqu'à l'uranium⁴⁰.

Les abondances prédites correspondant aux abondances observées, cette théorie remporta un impressionnant succès, notamment parce qu'elle offrait la possibilité de faire des prédictions quantitatives sur les réactions nucléaires internes aux étoiles. Mais elle apparut aussi, aux yeux des contemporains, comme un succès de la théorie de l'état stationnaire, car, dans le cadre de cette théorie, l'ensemble des abondances d'éléments chimiques devait être expliqué *uniquement* par la nucléosynthèse stellaire (puisqu'elle ne suppose pas d'Univers jeune et chaud pour réaliser la nucléosynthèse primordiale).

Le Dr Heckmann a exprimé des doutes à propos de la modification des équations fondamentales de la relativité générale impliquée par la théorie de l'état stationnaire. Je le rejoins sur ce point. Mais, en incitant à comprendre l'état présent du cosmos en terme de processus encore actifs aujourd'hui, cette théorie a mené au travail remarquable exposé hier par Hoyle sur la synthèse des éléments. Même si cette hypothèse est, comme je le pense, parfaitement fausse, elle a ainsi mené à de grand progrès de nos connaissances⁴¹.

Cette déclaration de Robert Oppenheimer (1904-1967) lors du 11^e congrès de Solvay en 1958, après que Hoyle eut présenté la théorie B²HF, est significative de la respectabilité que la théorie de l'état stationnaire

⁴⁰Margaret BURBIDGE et al., "Synthesis of the elements in stars", *Reviews of Modern Physics* 29 (1957), p. 547-650.

⁴¹Cité par KRAGH, *Cosmology and Controversy*.

gagna dans les années 1950, même pour ceux qui n’y adhéraient pas. Elle reflète l’état d’esprit des physiciens de l’époque : la théorie de l’état stationnaire avait beau sembler spéculative, absurde, voire fausse, elle n’en n’était pas moins une théorie *féconde* qui menait à faire des prédictions intéressantes non seulement pour les cosmologistes et les astronomes, mais aussi pour l’ensemble des physiciens. A l’inverse, la théorie de la nucléosynthèse primordiale ne semblait pas à cette époque être un terrain de recherche fécond parce qu’elle n’expliquait pas les abondances d’éléments chimiques plus lourds que le Lithium. C’est en accompagnant le développement de la radioastronomie que la théorie de l’état stationnaire rencontra ses premières difficultés.

L’émergence de la radioastronomie et ses conséquences pour la cosmologie

La radioastronomie, issue des recherches sur le radar pendant la Seconde Guerre mondiale, était un domaine en plein développement dans les années 1950. Cette technique consiste à utiliser de grandes antennes radio pour capter le rayonnement des sources radio dispersées dans l’Univers.

À cette époque, le principal observatoire de radioastronomie était celui de Martin Ryle (1918-1984) à Cambridge et avait pour mission principale de faire des relevés de toutes ces sources radio⁴². Des travaux similaires furent effectués au Radiophysics Laboratory de Sydney et au Jodrell Bank Observatory de Manchester.

Une fois admis que les sources radio étaient en majorité extragalactiques (et probablement très éloignées), deux des trois relevés de Cambridge effectués durant ces années (nommés « 1C », « 2C » et « 3C ») furent utilisés pour tester la théorie de l’état stationnaire. En effet, d’après les prédictions de Bondi et Gold, on aurait dû trouver une distribution homogène des sources radios dans l’Univers. Il était alors impossible d’évaluer la distance des sources en mesurant leur décalage spectral, mais il était possible de l’estimer à partir de la puissance de la source⁴³. Ainsi, l’observation de sources distribuées non uniformément réfuterait la théo-

⁴²C’est pour ce travail que Martin Ryle reçut un Prix Nobel en 1974.

⁴³Voir l’annexe au chapitre 4 qui décrit cette méthode.

rie de l'état stationnaire en infirmant l'une de ses prédictions. En revanche, les modèles d'Univers en évolution pouvant avoir différents âges et différents types de courbure, ils n'affirmaient rien au sujet du rapport entre le nombre des sources radio et leur puissance. On voit donc, à nouveau, que ce sont les prédictions de la théorie de l'état stationnaire qui ont été fécondes parce qu'elles établirent le premier contact entre la cosmologie et la radioastronomie.

Or, le 10 février 1961, le troisième relevé de source radios de Cambridge (le 3C) montra que le nombre de sources radios n'était pas proportionnel à leur puissance. Cette date est, à bien des égards, une date clef dans l'histoire de la théorie de l'état stationnaire, non parce que les résultats de Ryle ont été acceptés comme une réfutation claire et nette par les partisans de cette théorie, mais parce qu'à partir de ce jour ils durent y ajouter des hypothèses auxiliaires pour l'ajuster aux observations. Chaque partisan de cette théorie proposa sa propre modification de la théorie de l'état stationnaire et ils ne firent plus front commun. Un des jeunes chercheurs sur la théorie de l'état stationnaire, Dennis Sciama (1926-1999), suggéra ainsi que les résultats de Ryle relevaient d'un biais d'observation consistant à ne sélectionner que les sources les plus brillantes⁴⁴. Hoyle et son élève Jayant Narlikar supposèrent eux l'existence de « blobs », des amas de galaxies animés d'une vitesse intrinsèque les éloignant rapidement de notre galaxie, ce qui expliquerait les observations radioastronomiques.

Ces réactions montrent que même derrière leur refus d'accepter les résultats du 3C comme une réfutation, les cosmologistes de la théorie de l'état stationnaire, ainsi que la communauté des radioastronomes, considéraient que les observations en radioastronomie peuvent et doivent contraindre le choix des modèles cosmologiques. Le lien entre cosmologie et radioastronomie était acté : la cosmologie n'était déjà plus une discipline vaguement reliée aux données d'observations, mais une science qui influençait les recherches des astronomes et qui, en retour, devait prendre en compte les résultats de ces recherches.

⁴⁴Dennis SCIAMA, "L'observation et la cosmologie", *Annales de l'IHP* 17 (1961), p. 25-36.

À partir de 1961, les faits d'observation pertinents pour les modèles cosmologiques s'accumulèrent et la plupart allèrent à l'encontre des prédictions faites par la théorie de l'état stationnaire. Si pendant les années 1950 la capacité prédictive de cette théorie avait augmenté, elle s'amoin-drit progressivement à partir des années 1960 à cause des hypothèses auxiliaires qui y furent rajoutées pour la sauver de la réfutation. À l'inverse, à partir du début des années 1960, la théorie de la nucléosynthèse primordiale et les modèles d'Univers avec big bang connurent un regain d'intérêt, notamment grâce au rapide développement de leur capacité à prédire de nouvelles découvertes.

4.2.3 Le développement de la théorie du big bang dans les années 1960

Durant les années 1950, les principaux partisans de la théorie de la nucléosynthèse primordiale cessèrent de travailler sur des sujets liés à la cosmologie. C'est pourquoi cette théorie ne se développa que peu par rapport à la théorie de l'état stationnaire. Cela montre aussi que les remarques des partisans de la théorie de l'état stationnaire étaient en partie justifiées : la théorie de la nucléosynthèse primordiale contraint bien moins de paramètres cosmologiques que la théorie de l'état stationnaire et mène moins facilement à faire des prédictions testables par les astronomes. Pourtant, dans les années 1960, elle prit le pas sur la théorie de l'état stationnaire au point que celle-ci fut quasiment abandonnée à la fin de la décennie. Ce retournement de situation est dû à plusieurs facteurs.

La découverte des quasars

Tout d'abord, si la théorie de la nucléosynthèse primordiale, que l'on appelait désormais « théorie du big bang », revient au centre de l'intérêt des chercheurs, c'est parce que la théorie de l'état stationnaire buta sur une découverte difficile à expliquer : les quasars.

Les années 1960 furent celles de l'essor de la radioastronomie étatsunienne et, en 1963, Maartin Schmidt de l'Université de CalTech, arriva

à estimer que le décalage spectral vers le rouge de la radio source 3C273 était de $z = 0,16$ pour une magnitude apparente de $m = 13$. Cela en faisait un des objets les plus lointains jamais observé ayant une luminosité une centaine de fois supérieure à celle d'une galaxie. Autrement dit, selon cette observation, 3C273 était un objet lointain et ancien très différent des objets actuels⁴⁵. C'était un contre-exemple direct du principe cosmologique parfait.

Hoyle considérait que ces décalages étaient peut-être dus à des interactions gravitationnelles et que ces objets étaient en réalité des étoiles de notre galaxie, donc des objets proches ne remettant pas en question le principe cosmologique parfait. Mais en 1964, l'équipe de Schmidt estima que les quasars représentaient environ 30% du relevé 3C. Ils étaient tous décalés vers le rouge, comme des galaxies. Cela semblait confirmer qu'il s'agissait d'objets lointains, décalés vers le rouge à cause de l'expansion de l'Univers. Si les quasars étaient des objets à l'intérieur de la Voie Lactée, on devrait en effet s'attendre à ce que certains se déplacent vers nous en raison du jeu des forces gravitationnelles et donc soient décalés vers le violet.

Ainsi, à l'occasion d'un débat dans la revue *Nature* en 1966, Sciama et son élève Martin Rees firent paraître un article montrant que la théorie de Hoyle pour expliquer les décalages systématiques vers le rouge des quasars n'était pas cohérente avec les observations⁴⁶. Cet article marqua le revirement de Sciama qui abandonna alors la théorie de l'état stationnaire parce que l'explication des quasars demandait trop d'hypothèses auxiliaires. Étant alors professeur à Cambridge, ce revirement joua un grand rôle non seulement dans la perte de prestige de la théorie de l'état stationnaire, mais aussi dans la formation de la génération suivante de cosmologistes. Le mathématicien Roger Penrose, qui avait été en formation à Cambridge sous sa direction, évoqua ainsi l'influence qu'a eu sur lui cet épisode :

⁴⁵Depuis les années 1980 la nature des quasars fait consensus parmi les astrophysiciens : il s'agit de noyaux galactiques très denses entourant des trous noirs supermassifs.

⁴⁶Dennis SCIAMA et Martin REES, "Cosmological Significance of the Relation between Red-shift and Flux Density for Quasars", *Nature* 211 (1966), p. 1283.

Ensuite, Dennis Sciama, qui avait été un partisan des premières heures de la théorie de l'état stationnaire, changea de camp. Il fut convaincu par les observations. J'ai été très impressionné par ce revirement, si l'on considère qu'il avait été un tel partisan de l'état stationnaire auparavant⁴⁷.

Le cas de Dennis Sciama est le seul où l'un des partisans de la théorie de l'état stationnaire a clairement attribué son abandon de cette théorie à une observation précise. Et cette observation qui a réfuté la théorie de l'état stationnaire n'est pas celle du fond diffus cosmologique, comme le soutient S. Brush, mais celle des quasars.

Cependant, si les quasars sont *compatibles* avec la théorie du big bang, ils n'ont pas pour autant été *prédits* par cette théorie : aucune hypothèse de cette théorie ne permet d'affirmer l'existence de ces objets. On ne peut donc dire que la découverte des quasars a accru la capacité prédictive de la théorie du big bang. Mais une autre découverte permit de montrer que cette théorie avait une capacité prédictive considérable : le fait que l'on pouvait prédire les abondances d'hélium dans l'Univers à partir de l'hypothèse d'une nucléosynthèse primordiale.

La nucléosynthèse de l'hélium

Par une ironie de l'histoire, l'un des principaux artisans de la découverte des mécanismes de nucléosynthèse de l'hélium et par conséquent du déclin de la théorie de l'état stationnaire, n'est autre que Hoyle lui-même. Avant les années 1960, ni la théorie de la nucléosynthèse primordiale, ni la théorie B²HF (les deux principales théories expliquant les abondances des éléments chimiques) n'expliquaient la proportion d'hélium dans l'Univers (estimée à environ 30%). En 1967, Wagoner, Fowler et Hoyle montrèrent que cette proportion n'était pas explicable par la nucléosynthèse stellaire. En revanche, il était possible de prédire cette proportion en supposant soit une nucléosynthèse primordiale, soit des objets supermassifs considérés comme des « mini big bang »⁴⁸.

⁴⁷LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 424.

⁴⁸Robert WAGONER, William FOWLER et Fred HOYLE, "On the synthesis of elements at very high temperatures", *The Astrophysical Journal* 148 (1967), p. 3.

L'hypothèse de ces « mini big bang » parut arbitraire à la plupart des physiciens et aucun d'entre eux, à l'exception de Hoyle et Narlikar, ne la prit au sérieux. L'article de Wagoner et Hoyle peut ainsi être considéré comme l'un de ceux qui a le plus joué en faveur de la théorie du big bang en montrant qu'elle pouvait formuler des prédictions quantitatives précises, prédictions qui, de surcroît, pouvait intéresser d'autres domaines scientifiques comme l'astrophysique ou la physique des particules.

Mais si la théorie de Wagoner, Fowler et Hoyle a joué un rôle crucial dans l'augmentation de la capacité prédictive de la théorie du big bang, c'est le test de la prédiction par Alpher et Herman d'un rayonnement de l'Univers primordial lorsqu'il était chaud et dense qui est considéré aujourd'hui comme la cause décisive de son succès.

La prédiction du fond diffus cosmologique

Au début des années 1960, cette prédiction était oubliée : elle fut reformulée par deux chercheurs de l'Université de Princeton, Robert Dicke (1917-1976) et son élève Jim Peebles, qui n'avaient pas connaissance des travaux d'Alpher et Herman et qui travaillaient sur des modèles d'Univers clos en oscillation⁴⁹.

Selon Dicke, un Univers en oscillation doit, à la fin d'un cycle, se « débarrasser » de tous les éléments chimiques lourds produits par nucléosynthèse stellaire au cours de son existence, sinon il serait impossible que les étoiles les plus anciennes de notre Univers présentassent de très faibles abondances en éléments autres que l'hydrogène et l'hélium. Dicke imagine donc que l'Univers, à la fin d'une de ses oscillations, est suffisamment chaud ($\simeq 10^{10} K$) pour que s'y produisent des réactions de fission nucléaire, lesquelles, en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnement, entraînent une nouvelle expansion de l'Univers. C'est le rayonnement provenant de ce « big bang chaud » qui, selon Dicke, serait mesurable aujourd'hui et il laissa à J. Peebles la charge de faire le calcul précis de sa température actuelle⁵⁰.

⁴⁹Ce type d'Univers a une courbure positive mais son rayon varie de manière cyclique en fonction du temps.

⁵⁰LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 218.

Cela montre que la prédiction d'un rayonnement fossile pouvait être réalisée à partir d'autres hypothèses sur les conditions initiales de l'Univers que celles de la théorie de la nucléosynthèse primordiale de Gamow, Alpher et Herman. On a donc affaire ici à un autre cas de ce que l'on a appelé, dans le chapitre précédent (section 3.2.2) la *sous-détermination prédictive*. Mais la prédiction de Dicke et J. Peebles eut plus de succès que celle d'Alpher et de Hermann parce qu'elle venait avec l'observation la vérifiant : elle fut publiée dans le numéro de juillet 1965 de l'*Astrophysical Journal* à la suite d'un article de Penzias et Wilson, annonçant la découverte d'une température excédentaire de $3,5K$ dans des mesures réalisées en micro-ondes, effet systématique et isotrope attribué à un rayonnement d'origine cosmologique⁵¹. Penzias et Wilson étaient deux ingénieurs des laboratoires Bell qui obtinrent en 1963 la gestion de l'antenne de communication Bell Laboratory avec le satellite Echo, antenne dont la principale caractéristique était une isolation importante permettant de mesurer précisément le degré de bruit dans les observations et son origine⁵². Comme cet instrument permettait de recueillir les rayonnements de longueur d'onde $\lambda = 7,4cm$, ils commencèrent une série de mesures de la température du ciel et trouvèrent une température du halo galactique de $7,5K$ au lieu des $3K$ attendus. Ce biais systématique de $+5,5K$ qu'ils rencontrèrent à chacune de leur mesure fut interprété par la prédiction de Dicke et J. Peebles comme le rayonnement provenant du big bang et que l'on appelle aujourd'hui le fond diffus cosmologique.

La publication de juillet 1965 dans l'*Astrophysical Journal* présentait donc à la fois la prédiction du fond diffus cosmologique et des observations qui la confirment. Elle établit que l'Univers avait émis un rayonnement lors d'une phase dense et chaude, rayonnement qui semblait directement prouver la théorie de la nucléosynthèse primordiale.

En réalité, cette prédiction pouvait être réalisée par différents modèles d'Univers en évolution et ne confirmait aucun de ces modèles en

⁵¹Arno PENZIAS et Robert WILSON, "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.", *The Astrophysical Journal* 142 (1965), p. 419–421.

⁵²Pour un compte rendu détaillé de cette découverte, voir Robert WILSON, "Discovery of the cosmic microwave background", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 291–308

particulier mais, en revanche, elle semblait réfuter tout modèle d'Univers en état stationnaire.

Pourtant, en 1965, Hoyle n'abandonna pas la théorie de l'état stationnaire et émit l'hypothèse selon laquelle le fond diffus cosmologique était dû à une thermalisation de poussières interstellaires de graphites. Deux ans plus tard, il suggéra qu'il pourrait provenir des mêmes objets supermassifs qui seraient à l'origine de la synthèse de l'hélium (les mini big bang). A partir de la fin des années 1960 (et jusqu'à nos jours) Hoyle et J. Narlikar ont ainsi développé une nouvelle théorie, dite de « l'état *quasi-stationnaire* », dénuée de principe cosmologique parfait, qui peut, elle aussi, rendre compte de ce fond diffus cosmologique.

La réaction de Hoyle et J. Narlikar illustre parfaitement le fait que toute théorie peut échapper à la réfutation par l'ajout d'hypothèses auxiliaires. Mais aucune des hypothèses qu'ils proposèrent ne rendait compte « naturellement » du fond diffus cosmologique. Au contraire, il fallait ajuster de nombreux paramètres libres de la théorie de l'état quasi-stationnaire pour expliquer l'existence et l'aspect du fond diffus cosmologique.

À l'inverse, pour les partisans des modèles d'Univers en évolution, le fond diffus cosmologique fut immédiatement considéré comme un succès. Un rayonnement fossile à $5,5K$ peut être prédit par différents modèles d'Univers, mais l'existence d'un tel rayonnement est une prédiction *robuste* de l'hypothèse d'une nucléosynthèse primordiale parce qu'elle en découle sans l'ajout d'aucune hypothèse auxiliaire pour fixer précisément certains de ses paramètres. On peut en effet ajuster de manière différente les paramètres cosmologiques de la théorie du big bang : tant que l'on choisit un modèle d'Univers ayant connu une nucléosynthèse primordiale, il y a de fortes chances qu'il existe un rayonnement fossile actuellement détectable⁵³.

La découverte du fond diffus cosmologique montra ainsi que la théorie du big bang ou toute théorie supposant que l'Univers a été chaud et dense dans le passé pouvait aussi réaliser des prédictions robustes et fécondes.

⁵³Lemaître avait déjà imaginé que les rayons cosmiques étaient une forme de rayonnement cosmique issu des premières fissions nucléaires de l'Univers. Voir Georges LEMAÎTRE, *L'Hypothèse de l'atome primitif*, Alençon, Imprimerie Alençonnaise, 1948.

En ce sens, elle représente bien un succès important de cette théorie, succès d'un type que la théorie de l'état stationnaire, malgré toutes ses fécondes prédictions, n'a jamais connu.

4.3 Conclusion du chapitre : qui a tué la théorie de l'état stationnaire ?

4.3.1 Deux hypothèses sur les causes de la mort de la théorie de l'état stationnaire

Qu'il y ait eu, dans les années 1960, une conversion de la majorité des astronomes et cosmologistes à la théorie du big bang accompagnée d'un rejet de la théorie de l'état stationnaire, laisse peu de place au doute. Aux longs témoignages regroupés par le physicien Alan Lightman et l'historienne Roberta Braver à la fin des années 1980⁵⁴, on peut ajouter les sondages réalisés par la revue américaine *Astronomy Quarterly*⁵⁵ :

	1959		1980	
	Favorables (%)	Défavorables (%)	Favorables (%)	Défavorables (%)
Théorie du big bang	33	36	69	7
Théorie de l'état stationnaire	24	55	2	91

La question est ici de déterminer l'importance des prédictions des théories de l'état stationnaire et de la nucléosynthèse primordiale dans l'acceptation de la théorie du big bang et le rejet de la théorie de l'état stationnaire.

Les historiens de la cosmologie ont soutenu deux thèses opposées à ce sujet :

⁵⁴LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*.

⁵⁵1982relativistic.

- La découverte du fond diffus cosmologique est la principale (voire l'unique) cause de la disparition de la théorie de l'état stationnaire. C'est la thèse de S. Brush dans « Prediction and theory-evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang »⁵⁶.
- La découverte du fond diffus cosmologique n'a pas joué le rôle d'expérience cruciale ; la théorie de l'état stationnaire est morte sous l'accumulation de preuves provenant de divers domaines. C'est la thèse de H. Kragh, dans *Cosmology and controversy*⁵⁷.

En accordant une place centrale à *une* prédiction, la position de S. Brush doit faire face à trois objections.

1.) Selon lui, les partisans de la théorie de l'état stationnaire auraient abandonné leur théorie à cause de leur adhésion à un « principe de Popper » selon lequel, pour évaluer une théorie, seuls comptent les tests de prédictions temporellement nouvelles, c'est-à-dire de phénomènes non encore observés à l'époque où la prédiction est formulée. Or, on a vu dans ce chapitre que si Bondi se défendait bien contre les accusations visant sa théorie cosmologique en se référant aux travaux de Popper, il n'a jamais utilisé ni fait référence à ce « principe de Popper ». On peut rajouter que Popper lui-même n'a jamais formulé ainsi sa propre épistémologie, puisque rien n'indique qu'il ait eu une conception *temporelle* de la nouveauté des prédictions⁵⁸, c'est-à-dire qu'il ait utilisé le terme *prédiction* dans le sens que lui prête S. Brush.

2.) De plus, la découverte du fond diffus cosmologique ne fut *décisive* pour aucun des fondateurs ni des principaux partisans de la théorie de l'état stationnaire. Le seul cas où une découverte fit radicalement changer d'avis un de ceux qui soutenaient cette théorie est la découverte des quasars qui a amené Sciamia à rejeter la théorie de l'état stationnaire en 1966. Considérer que seul le fond diffus cosmologique ait suffi à renverser la théorie de l'état stationnaire tient en grande partie de l'illusion rétrospective parce que le fond diffus cosmologique a eu une importance

⁵⁶BRUSH, "Prediction and theory evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang."

⁵⁷KRAGH, *Cosmology and Controversy*, p. 373.

⁵⁸Voir chapitre 6, section 6.3.2.

centrale dans les recherches des cosmologistes au cours des décennies 1980-1990.

3.) Enfin, d'un strict point de vue scientifique, la découverte du fond diffus cosmologique en 1965 ne confirme pas réellement la théorie du big bang et ne réfute pas plus la théorie de l'état stationnaire. Il ne s'agit pas d'une *experimentum crucis* qui permettrait de trancher entre ces deux théories. En effet, ce que découvrent Penzias et Wilson en 1965, c'est la température du ciel à *une* longueur d'onde donnée : 7,4 cm. Or, pour s'assurer que ce rayonnement a bien une origine *cosmologique* et ne vient pas, par exemple, d'étoiles ou de galaxies éloignées, il faut non seulement s'assurer que ce rayonnement est isotrope (qu'il vient de toutes les directions du ciel) mais aussi s'assurer qu'il a le spectre d'un corps noir. Pour ce faire, il faut mesurer ce rayonnement à différentes longueurs d'onde⁵⁹. En effet, si le rayonnement découvert par Penzias et Wilson a été émis par l'Univers jeune et chaud, ce rayonnement doit suivre la courbe théorique du spectre du corps noir prédite par la loi de Planck. Or il fallut attendre 1989 et le lancement du satellite COBE pour obtenir un spectre complet du fond diffus cosmologique. Le fait que ce spectre corresponde exactement à la courbe théorique du spectre du corps noir est effectivement une preuve empirique directement incompatible avec le principe cosmologique parfait. Mais jusqu'en 1989, les partisans de cette théorie pouvaient entretenir l'espoir d'une réfutation de la théorie du big bang avec la découverte d'irrégularités dans les spectre du fond diffus cosmologique.

Ainsi, en 1989, Hoyle estimait que :

[Le spectre du] fond microonde a une forme bizarre à cause de récentes mesures japonaises à l'échelle submillimétrique. Si ces mesures sont vérifiées, cela pourrait représenter un pro-

⁵⁹Un corps noir est un corps idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sans en réfléchir ni en transmettre. Le spectre d'un corps correspond au rayonnement émis par un corps à l'équilibre thermique : son intensité en fonction de la longueur d'onde est déterminée théoriquement par la loi de Planck. L'Univers est l'objet naturel qui se rapproche le plus d'un corps noir puisque, par définition, il ne peut ni réfléchir ni transmettre d'énergie électromagnétique à un autre corps que lui-même.

blème [pour la théorie du big bang]⁶⁰.

Ainsi, la thèse de S. Brush sur la disparition de la théorie de l'état stationnaire oublie que les preuves et les réfutations *directes* d'une théorie mettent du temps à être recueillies et le sont bien souvent après que la théorie en question a été acceptée par ses opposants les plus farouches ou abandonnée par ses partisans les plus tenaces⁶¹.

Au vu de ces objections, la position de S. Brush selon laquelle la prédiction du fond diffus cosmologique par la théorie de la nucléosynthèse primordiale a joué le rôle principal dans l'établissement de la théorie du big bang ne semble pas tenable : elle résulte d'un biais de sélection consistant à ne retenir qu'une cause isolée pour expliquer des événements historiques. Or c'est toujours un faisceau de preuves — de prédictions et de découvertes — qui intervient dans les décisions d'une communauté scientifique, notamment lorsqu'il s'agit d'accepter ou de rejeter une nouvelle théorie.

Il semblerait donc que la position de H. Kragh sur la résolution de la controverse entre les théories de l'état stationnaire et de la nucléosynthèse primordiale soit plus conforme à la réalité historique. C'est un *ensemble* de découvertes et de preuves, sans rapport direct les unes avec les autres (relevés de sources radio, quasars, nucléosynthèse de l'hélium, fond diffus cosmologique, etc.), qui, dans les années 1960, s'est accumulée contre le principe cosmologique parfait de la théorie de l'état stationnaire et l'a rendu insoutenable.

Cette analyse de H. Kragh peut être rapprochée de celle que Duhem fait de la conversion du physicien Biot à la théorie ondulatoire de la lumière :

Un jour vient où le bon sens se déclare si clairement en faveur d'un des deux partis que l'autre renonce à la lutte, alors

⁶⁰LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 61.

⁶¹Comme le faisait remarquer Lakatos, le système ptoléméen par exemple ne fut réfuté par une observation que dans les années 1830 par les premières mesures de parallaxes annuelles — soit plusieurs décennies après que l'Église catholique romaine elle-même eut accepté ce système. Voir Imre LAKATOS et Élie ZAHAR, "Why did Copernicus's research programme supersede Ptolemy's?", *Philosophical papers I*, New York, Cambridge University Press, 1980, p. 168–192, p. 173.

que la logique n'en interdirait pas la continuation. Après que l'expérience de Foucault eut montré que la lumière se propageait plus vite dans l'air que dans l'eau, Biot renonça à soutenir l'hypothèse de l'émission ; en toute rigueur la pure logique ne l'eût point contraint à cet abandon car l'expérience de Foucault n'était point l'*experimentum crucis* qu'Arago y croyait reconnaître ; mais en résistant plus longtemps à l'Optique vibratoire, Biot aurait *manqué de bon sens*⁶².

Pour Duhem, le « bon sens » n'est pas une faculté *logique* en ce sens qu'aucun principe de logique déductive n'interdit de modifier une théorie pour qu'elle échappe à une réfutation : « la saine critique expérimentale d'une hypothèse est subordonnée à certaines conditions morales ; pour apprécier exactement l'accord d'une théorie physique avec les faits, il ne suffit pas d'être bon géomètre et expérimentateur habile, il faut encore être juge impartial et loyal »⁶³. Le bon sens est donc une faculté *morale* pour Duhem, faculté qui est d'un autre ordre que celle qu'utilisent les physiciennes pour développer mathématiquement leurs théories et qui ne se déploie pas sur le terrain de la déduction et du raisonnement.

4.3.2 Prédiction robuste et prédictions fécondes

On peut affirmer avec H. Kragh que c'est plus un ensemble de preuves et de découvertes qu'une prédiction isolée qui fut décisif dans le rejet de la théorie de l'état stationnaire et l'établissement de la théorie du big bang. Cependant, cela ne veut pas dire que les prédictions n'ont joué aucun rôle dans ce changement théorique, ni que le choix des cosmologistes n'a reposé, en dernière instance, que sur une qualité *morale* comme le soutient Duhem.

En effet, si les années 1950 virent une augmentation de la capacité de la théorie de l'état stationnaire à réaliser des prédictions sans fixer arbitrairement des paramètres libres comme la courbure de l'espace ou le taux d'expansion de l'Univers, les découvertes des années 1960 forcèrent

⁶²DUHEM, *La Théorie physique*, p. 331.

⁶³DUHEM, *La Théorie physique*, p. 332.

les partisans de cette théorie à introduire de nombreuses hypothèses dans le seul but de lui éviter la réfutation.

Or, l'ajout d'hypothèses auxiliaires a des effets complexes sur la capacité prédictive d'une théorie. Rappelons que sans cette forme d'hypothèses auxiliaires que sont les *conditions aux limites* (voir section 1.4), il est impossible de mener à bien un raisonnement prédictif. Mais ce que montre le cas de la théorie de l'état stationnaire, c'est que l'ajout d'un trop grand nombre d'hypothèses auxiliaires fait baisser la capacité prédictive d'une théorie parce qu'il rend les raisonnements prédictifs délicats à réaliser.

En effet, lorsque l'on ajoute des hypothèses auxiliaires à une théorie, il est nécessaire de fixer arbitrairement la valeur des paramètres libres de ces hypothèses, à moins d'utiliser d'autres hypothèses auxiliaires. De plus, s'il faut prendre en compte un grand nombre d'hypothèses auxiliaires pour dériver la moindre prédiction, la théorie devient concrètement impraticable et est délaissée au profit de théories permettant des prédictions plus simples à réaliser.

Pour maximiser la capacité prédictive d'une théorie, il ne faut donc pas pas qu'il y ait tant d'hypothèses auxiliaires que chaque processus prédictif devienne une tâche trop complexe pour être réalisée, mais il faut qu'il y en ait suffisamment pour que les principes fondamentaux de cette théorie puissent être appliqués à un grand nombre de cas⁶⁴.

Reprenons le cas de la théorie de l'état stationnaire. Pour prédire les bonnes quantités d'hélium dans l'Univers, il faut lui adjoindre l'hypothèse de « mini big bang » dont la masse et l'énergie doivent être fixées arbitrairement. De plus, pour prédire l'existence du fond diffus cosmologique, il faut faire l'hypothèse de poussières interstellaires responsables de la diffusion isotrope du rayonnement des étoiles et des galaxies, dont la composition et la densité ne peuvent être fixées qu'arbitrairement. Enfin, pour concilier la théorie de l'état stationnaire et les relevés de sources radios, Hoyle et Narlikar mirent en avant la possibilité de « blobs », des amas de galaxies dotés d'une vitesse radiale intrinsèque. Si ces blobs avaient été

⁶⁴Dans l'annexe du chapitre 7, on montre qu'il est possible de définir un tel équilibre entre simplicité et fécondité des hypothèses auxiliaires.

justifiés par d'autres découvertes par la suite, cela aurait été un argument convaincant en faveur de leur existence. Mais cette hypothèse étant très difficile (voire impossible avec les technologies d'observation des années 1960) à tester, les astronomes ne virent aucun intérêt à en rechercher la trace.

Ainsi, la théorie de l'état stationnaire devint peu à peu, par l'accumulation de ces hypothèses auxiliaires, une théorie qui ne pouvait plus servir à réaliser des prédictions sans fixer arbitrairement un grand nombre de paramètres apparaissant dans les hypothèses auxiliaires pour lui permettre d'échapper à la réfutation. Sans même mentionner les difficultés — mathématiques et observationnelles — pour tenir compte des perturbations impliquées par ces poussières, mini big bang et blobs, ces hypothèses avaient fait perdre à la théorie de l'état stationnaire le principal attrait qu'elle avait dans les années 1950 : permettre de réaliser un grand nombre de prédictions sans avoir à ajuster arbitrairement la valeur des paramètres cosmologiques.

À l'inverse, avec la résolution, au cours des années 1960, des problèmes qui empêchaient son développement, la théorie du big bang est apparue de plus en plus comme une théorie non seulement cohérente mais aussi capable de réaliser des prédictions robustes et fécondes. Sur ce point, la découverte du fond diffus cosmologique a bien été décisive, non parce qu'elle avait été prédite dès 1948 ni parce qu'elle réfutait la théorie de l'état stationnaire, mais parce qu'elle ouvrait la voie à l'application des résultats de la physique nucléaire à la cosmologie.

Le succès de la théorie du big bang et le déclin de la théorie de l'état stationnaire peuvent donc être expliqués sans faire appel au « bon sens » des physiciens, astronomes et cosmologistes. Ces scientifiques ont perçu l'inversion de la dynamique entre la théorie de l'état stationnaire et de la nucléosynthèse primordiale : alors que la capacité prédictive de la première déclinait, celle de la seconde augmentait. Dans les témoignages des cosmologistes contemporains recueillis par Lightman et Brawer⁶⁵ ce n'est

⁶⁵Ces témoignages ayant été recueillis en 1990, 25 ans après la découverte du fond diffus cosmologique, ils doivent être appréhendés avec précaution. On sait que les acteurs d'une révolution scientifique ont tendance, lorsqu'ils racontent cette révolution, à mettre en avant des raisons à leur comportement qui n'étaient peut-être pas aussi

pas l'« honnêteté intellectuelle » qui semble avoir motivé les cosmologistes à adopter la théorie du big bang, mais bien les perspectives de recherches ouvertes par celle-ci.

Le jugement du physicien Steven Weinberg sur cette controverse qui se déroula pendant ses années de formation et le début de sa carrière professionnelle, témoigne par exemple du fait qu'une partie des scientifiques intéressés par la cosmologie furent sensibles à ces changements dans la capacité prédictive des deux théories rivales. Ainsi, pendant ses études qui eurent lieu durant les années 1950 à l'Université de Cornell et à Princeton, il préférait la théorie de l'état stationnaire pour ses prédictions précises :

À l'époque de ma maîtrise [*graduate school*], j'étais plus attiré par le modèle de l'état stationnaire de Bondi et Gold et aussi de Hoyle. Je ne me le suis pas formulé ainsi à l'époque, mais, rétrospectivement, je pense que ce que j'aimais dans ce modèle, c'était qu'il offrait le plus de possibilités de réaliser des prédictions bien définies. [...] Les modèles Friedmann-Robertson-Walker de big bang laissent certains paramètres indéterminés, là où le modèle d'état stationnaire détermine absolument tout. Le paramètre de décélération est -1 et vous n'avez pas à vous préoccuper de l'évolution [des paramètres de l'Univers] parce qu'en moyenne, il n'y a pas d'évolution⁶⁶.

S. Weinberg ne s'engagea pas tout de suite dans la cosmologie mais devint physicien des particules (avec un succès puisqu'il obtint le prix Nobel de physique en 1974 pour avoir formulé la théorie de l'interaction faible). Comme de nombreux physiciens, la cosmologie ne devint pour lui un objet de recherche qu'après la découverte du fond diffus cosmologique, qu'il décrit ainsi :

La découverte du fond diffus cosmologique a tout changé parce qu'elle a transformé la spéculation cosmologique sur

claires lorsqu'ils l'ont vécue. Mais cette reconstruction rétrospective est intéressante en elle-même, car elle met en évidence ce que ces scientifiques considèrent comme des raisons « légitimes » d'avoir adopté une théorie plutôt qu'une autre.

⁶⁶LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 452-453.

les premières minutes en une science normale et respectable. Ainsi, si quelqu'un, par exemple, calculait les effets de nouveaux neutrinos sur la nucléosynthèse primordiale, c'était vu comme un sujet respectable. Vous étiez en train de travailler dans un cadre scientifique que tout le monde comprenait et qui avait connu plusieurs succès. Ce n'était peut-être pas *vrai*, mais au moins c'était quelque chose qui valait la peine d'être fait⁶⁷.

Pour S. Weinberg, la découverte a « tout changé » non parce qu'elle a réfuté la théorie de l'état stationnaire, mais parce qu'elle a ouvert la possibilité, offerte par la théorie de la nucléosynthèse, de faire des calculs précis sur les abondances des particules dans l'Univers. Ainsi, la théorie du big bang aurait permis à la cosmologie de devenir « un sujet respectable » parce que ses prédictions étaient plus *fécondes*, c'est-à-dire mieux reliées à d'*autres disciplines* (comme la physique des particules, la radioastronomie et l'astrophysique) que celles de la théorie de l'état stationnaire.

J. Peebles, qui fut à l'origine d'une des prédictions du fond diffus cosmologique, explique de la même manière pourquoi il a accepté de collaborer avec Dicke lorsque celui-ci lui proposa de travailler sur le problème du rayonnement cosmologique :

Est-ce que j'ai trouvé ce défi excitant ? oui, c'est sûr. Je pouvais imaginer beaucoup de physique qui pouvait être faite sur ce sujet. Si vous avez un rayonnement, vous avez un décalage du rayonnement ; vous avez une histoire thermique, donc vous pouvez penser au taux de réaction ; vous pouvez penser à transformer le plasma en hydrogène atomique, en hydrogène moléculaire ; vous pouvez penser à transformer un gaz de protons et de neutrons en hélium et ainsi de suite. Donc c'était amusant, parce qu'il s'agissait de sections efficaces, de thermodynamique ; c'était quelque chose que vous pouviez calculer et relier aux observations⁶⁸.

⁶⁷LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 457.

⁶⁸LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 220.

Cette remarque de J. Peebles en révèle autant par ce qu'elle affirme que par ce qu'elle passe sous silence. Ce n'est pas la perspective de réfuter la théorie de l'état stationnaire, ni de confirmer la théorie du big bang, qui le motiva, mais les liens que pouvait tisser la prédiction du fond diffus cosmologique entre la cosmologie, la thermodynamique, la physique nucléaire (les « sections efficaces » des atomes) et les observations astronomiques. Ce qui fut déterminant dans la prédiction du fond diffus cosmologique ce fut sa *fécondité*, les perspectives qu'elle fit émerger et l'espoir de pouvoir réaliser de nouvelles prédictions à partir de la théorie du big bang.

Par conséquent, si l'on se fonde sur ces témoignages, l'attraction pour la théorie de l'état stationnaire durant les années 1950 était due à ses prédictions *robustes* : elle avait montré que l'on pouvait tirer des prédictions bien définies sans avoir à ajuster arbitrairement les paramètres cosmologiques. Mais à partir des années 1960, au fur et à mesure que la théorie de l'état stationnaire perdait cette capacité à réaliser des prédictions robustes, la théorie du big bang a montré sa capacité à réaliser des prédictions *fécondes*, c'est-à-dire des prédictions dont la dérivation peut être utilisée pour résoudre d'autres problèmes et rendre compte d'autres observations. Cette fécondité des prédictions de la théorie du big bang semble avoir été décisive dans l'évaluation que les scientifiques ont fait de cette théorie. Ils ont parié que sa capacité prédictive irait en grandissant et que cela ouvrirait des perspectives de recherches au croisement de la cosmologie, de l'astronomie et de la physique des particules suffisamment intéressantes pour mériter leur temps et leurs efforts.

Ainsi, certaines prédictions sont suffisamment impressionnantes pour que les scientifiques les considèrent comme le signe du développement futur de la capacité prédictive d'une hypothèse, d'un modèle ou d'une théorie. Ce sont ces prédictions qui jouent un rôle dans l'évolution historique d'une discipline et que j'appelle une *prédiction féconde*. Derrière cette appellation se tient l'une des principales idées de cette thèse : certaines prédictions réussies apparaissent, aux yeux des scientifiques, comme une indication que l'hypothèse, la théorie ou le modèle qui les a générées sera capable de réaliser de nouvelles prédictions réussies dans le futur.

Ce sont ces prédictions qui jouent un rôle important dans l'évolution de l'histoire des sciences et la confirmation des théories. Ce sont notamment ces prédictions fécondes qui permettent à une discipline d'être intégrée à d'autres sciences et de devenir mature aux yeux de l'ensemble de la communauté scientifique.

4.3.3 La cosmologie est-elle considérée comme une science mature à la fin des années 1960 ?

On attribue à l'astronome Peter Scheuer (1930-2001) l'affirmation suivante, qu'il aurait prononcée en 1963 en réponse à un étudiant qui lui demandait s'il devait se spécialiser en cosmologie :

La cosmologie est une science où il n'y a que deux faits et demi : la nuit est noire, les galaxies sont en récession et l'Univers est probablement en évolution.

Même si cette déclaration n'est pas avérée, le fait qu'elle ait été transmise jusqu'à nous témoigne de la (mauvaise) réputation qu'avait encore la cosmologie auprès des astronomes au début des années 1960.

Mais dès la fin des années 1960 les rapports entre cosmologie et observations ne se limitaient plus à deux faits et demi : la nucléosynthèse primordiale, les origines cosmologiques des éléments que l'on trouve dans l'Univers, le fond diffus cosmologique et l'évolution des galaxies sont autant de faits établis conjointement par la cosmologie, l'astronomie, la radioastronomie et la physique nucléaire.

Les affirmations de S. Weinberg ou J. Peebles montrent que les sujets liés à la structure et à l'origine de l'Univers étaient considérés comme « respectables » à la fin des années 1960, parce qu'il était justement possible de lier les modèles cosmologiques aux résultats d'autres disciplines et ainsi de contraindre ces modèles par des observations.

Ces liens que la cosmologie tissa avec d'autres disciplines lui permirent d'être considérée comme une science mature par la majorité de la communauté scientifique à partir de la fin des années 1960. Une preuve de ce nouveau statut est le fait que si la plupart des prix Nobel de physique

des années 1950 jusqu'aux années 1960 furent décernés à des travaux en physique des particules, on vit apparaître les premiers prix Nobel pour des recherches en cosmologie dans les années 1970⁶⁹.

Mais la cosmologie entra aussi en contact avec des disciplines fondamentales. Les années 1960 furent celles de la « Renaissance de la relativité générale », suite aux résultats mathématiques de trois chercheurs de Cambridge : Roger Penrose, Stephen Hawking et G. Ellis. À partir de 1965, ils prouvèrent des *théorèmes de singularité* démontrant, à partir des équations de champ d'Einstein et de certaines hypothèses sur les conditions aux limites de l'énergie, l'existence de singularités, c'est-à-dire de points de l'espace-temps où l'on ne peut définir le champ gravitationnel sans que la densité et la courbure deviennent infinies. Si ces théorèmes sont d'abord applicables aux *trous noirs*, ils furent utilisés dès 1968 pour « montrer que l'Univers contient une singularité »⁷⁰, c'est-à-dire pour interpréter le fond diffus cosmologique comme la singularité initiale de l'Univers. La cosmologie relativiste et les modèles d'Univers avec big bang sont ainsi devenus rapidement, entre 1963 et 1969, le fondement de nouveaux travaux et de nouveaux problèmes stimulant de nombreuses communautés scientifiques différentes, y compris celle de la physique théorique.

En développant des problèmes partagés avec d'autres disciplines, la cosmologie est devenue une science « mature », ou en tout cas plus respectable qu'auparavant. La controverse entre la théorie de l'état stationnaire et celle de la nucléosynthèse primordiale a permis de développer des prédictions fécondes qui ont utilisé des méthodes et des données provenant d'autres disciplines et qui ont guidé en retour les recherches dans ces

⁶⁹Plusieurs prix Nobel de physique ont été attribués à des cosmologistes durant cette période : en 1974 à Martin Ryle et Antony Hewish pour leurs découvertes en radioastronomie, en 1978 à Arno Penzias et Robert Wilson pour leur découverte du fond diffus cosmologique, en 2006 à John Mather et George Smoot pour leur découverte des fluctuations du fond diffus cosmologique et en 2011 à Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess pour leur découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Ces prix indiquent la reconnaissance scientifique dont bénéficie aujourd'hui la cosmologie, reconnaissance qui contraste fortement avec les accusations de pseudo-scientificité dont elle a fait l'objet jusqu'aux années 1960.

⁷⁰Stephen HAWKING et George ELLIS, "The cosmic black-body radiation and the existence of singularities in our universe", *The Astrophysical Journal* 152 (1968), p. 25–36, p. 25.

autres disciplines. C'est une des raisons pour lesquelles les prédictions fécondes influencent l'évaluation de nouvelles théories par les scientifiques. Lorsqu'une prédiction prouve la capacité d'une théorie à interagir avec d'autres disciplines, cette théorie paraît être plus à même de réaliser de nouvelles prédictions qu'une théorie déconnectée, voire en contradiction, avec le reste de l'édifice de la science.

Ainsi, c'est la fécondité des prédictions de la théorie du big bang et, partant, de la cosmologie, qui lui a donné les marques de maturité qui lui manquaient à la fin des années 1930. Une science mature n'est donc pas forcément une discipline qui a trouvé « la voie sûre d'une science » en délimitant un domaine qui lui est propre et en se repliant sur son objet et ses méthodes. Une science peut également acquérir ce statut en jouant un rôle d'interaction entre différentes sciences et en les intégrant dans un cadre théorique cohérent. Cette intégration de la cosmologie à d'autres disciplines, à l'astrophysique et à la physique des particules notamment, s'est davantage renforcée entre les années 1970 et 2000, qui sont étudiées dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Le rôle des prédictions dans le développement de la théorie de l'inflation des années 1970 à nos jours

À la fin des années 1960, malgré la défiance persistante de nombreux scientifiques, la théorie du big bang devint la théorie dominante en cosmologie. S. Weinberg fit paraître en 1972 un manuel de cosmologie dans lequel il décrit ce qu'il appelle, en imitant l'appellation de la physique des particules, le « modèle standard de la cosmologie »¹. Ce modèle standard et les interactions qu'il permet avec la physique des particules est décrit dans la première section de ce chapitre.

D'après le récit que font R. Brawer et A. Lightman de cette période de la cosmologie², le consensus autour de ce modèle standard aurait progressivement été mis à l'épreuve dans les années 1970 avec la découverte de plusieurs « énigmes » liées à l'hypothèse du big bang. Ces énigmes auraient été résolues avec le développement, dans les années 1980, d'une nouvelle théorie : la cosmologie de « l'inflation », basée sur l'hypothèse selon laquelle l'Univers aurait connu une phase d'expansion exponentielle

¹Steven WEINBERG, *Gravitation and cosmology : principles and applications of the general theory of relativity*, Wiley, 1972.

²LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 42-46.

extrêmement rapide pendant les tout premiers instants de son expansion. Cette conception du développement de la théorie de l'inflation — qui vint, sinon remplacer, du moins modifier en profondeur la théorie du big bang — ne semble pas donner de rôle particulier aux prédictions, puisque la cosmologie de l'inflation n'aurait été introduite que pour résoudre des problèmes de cohérence logique de la théorie du big bang.

Dans la deuxième section de ce chapitre, je montre qu'en effet le pouvoir prédictif de cette théorie de l'inflation, formulée indépendamment par deux physiciens, Alan Guth et Alexei Starobinsky, a été questionné durant les années 1980. De nombreux scientifiques considéraient que les énigmes auxquelles elle répondait n'étaient pas des problèmes scientifiques légitimes et que l'on ne pouvait pas considérer leur résolution comme des succès prédictifs. Ces débats montrent que la définition de la notion de prédiction est un problème discuté par les scientifiques eux-mêmes lorsqu'ils examinent le statut de leurs hypothèses.

Dans la troisième section je montre que les prédictions ont bien joué un rôle dans l'acceptation de la théorie de l'inflation. À partir du début des années 1990, l'obtention de données de plus en plus précises sur le fond diffus cosmologique, notamment grâce au lancement du satellite artificiel COBE, ont en effet permis à la théorie de l'inflation de développer sa capacité prédictive en devenant la première théorie à pouvoir prédire l'origine des « grandes structures de l'Univers », c'est-à-dire les étoiles, les galaxies et les amas de galaxies. Je soutiens ainsi que la capacité prédictive de la théorie de l'inflation a bien joué un rôle important dans son évaluation et son acceptation par les cosmologistes, astrophysiciens et physiciens et je montre quel type de succès prédictif a permis à cette théorie de s'imposer auprès de ce public.

5.1 Succès et problèmes du modèle standard de la cosmologie dans les années 1970

Durant la décennie qui suivit l'établissement de la théorie du big bang, la science cosmologique engrangea un certain nombre de succès prédictifs, notamment grâce à la collaboration entre cosmologistes et physiciens des

particules. Ce développement de la capacité prédictive de la théorie du big bang a été permis par l'émergence d'une nouvelle communauté de cosmologistes attirés par les succès prédictifs de cette théorie à la fin des années 1960.

5.1.1 Le contexte d'apparition du modèle standard de la cosmologie

La fin des années 1960 et les années 1970 sont marquées par l'émergence d'une nouvelle génération de cosmologistes et d'un nouveau contexte scientifique :

- **États-Unis** : les universités qui jouèrent un rôle majeur en cosmologie à partir des années 1970 furent notamment l'Université de Chicago, où travaillait David Schramm (1945-1997), Caltech (Californie) et Princeton (New Jersey), où officiaient notamment Dicke, J. Peebles et James Gunn. S. Weinberg, après y avoir été diplômé, fut employé à Berkeley, au MIT et à Harvard, avant de rejoindre l'Université d'Austin au Texas, qui, en recrutant aussi Gérard de Vaucouleurs par exemple, prit progressivement une place importante dans la communauté des cosmologistes. D'autres universités comme Stanford ou le MIT, employèrent de nombreux spécialistes en physique des particules qui sont intervenus dans le débat sur la théorie de l'inflation.
- **Royaume-Uni** : Cambridge restait un haut lieu de la cosmologie européenne, où l'on trouvait notamment les auteurs des théorèmes de singularité, acteurs de la « Renaissance de la relativité générale » : S. Hawking, R. Penrose et G. Ellis.
- **URSS** : à partir du début des années 1960, plusieurs des scientifiques ayant contribué au programme nucléaire soviétique dirigèrent leur intérêt vers des questions d'astrophysiques et de cosmologie — notamment parce qu'ils furent écartés des programmes militaro-scientifiques en raison de leur opposition croissante au régime. Parmi eux, on trouve Lev Landau (1908-1968) et Andrei

Sakharov (1921-1989), lequel revint à la recherche fondamentale en 1965 et publia plusieurs articles sur l'Univers en expansion. Le physicien Yakov Zel'Dovich (1914-1987), lui aussi impliqué dans les programmes nucléaires militaires jusqu'à la fin des années 1940, s'intéressa dès 1964 à des problèmes liés aux trous noirs, puis aux perturbations du fond diffus cosmologique. Il fut nommé professeur au département de physique de l'Université de Moscou en 1965 où il mena des recherches dans quasiment tous les domaines de la cosmologie : la singularité initiale, la nucléosynthèse primordiale, les perturbations du fond diffus cosmologique, la formation des galaxies, etc.³ Il a formé et influencé un grand nombre des physiciens russes qui ont joué un rôle dans les controverses cosmologiques des décennies suivantes comme Andrei Linde et A. Starobinsky.

Comme on le voit, ce contexte était fortement marqué, aux États-Unis et en URSS, par le rapprochement entre la physique des particules et la cosmologie, qui, suite aux recherches en nucléosynthèse primordiale, apparaissait désormais comme un sujet clairement défini, mathématiquement bien formalisé et suffisamment contraint par les observations pour pouvoir trancher entre les prédictions des modèles rivaux d'Univers.

Un des succès qui a le plus contribué à sceller l'alliance de la physique des particules et de la cosmologie est la prédiction, réalisée en 1977 par J. Gunn et D. Schramm que le nombre total de types de leptons⁴ était inférieur ou égal à cinq. Autrement, l'abondance d'hélium produite dans l'Univers jeune aurait été différente et n'aurait pas correspondu aux abondances observées. Cette prédiction fut ensuite confirmée par des expériences du CERN et du Stanford Linear Accelerator, qui conclurent qu'il n'existe que trois familles de leptons. Cette coopération fructueuse entre cosmologie et physique des particules montre que le pari réalisé par des physiciens comme S. Weinberg ou J. Peebles dans les années 1960 (qui considéraient que rien n'empêchait la capacité prédictive de la théo-

³Une anecdote, dont je n'ai pu vérifier l'authenticité, veut que S. Hawking pensait, avant de rencontrer Zel'Dovich, qu'il s'agissait d'un groupe de chercheurs regroupé sous un même nom, comme le groupe de mathématiciens français Nicolas Bourbaki.

⁴Les leptons sont des fermions particules du modèle standard qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte, comme par exemple l'électron ou le neutrino.

rie du big bang d'augmenter après ses prédictions fécondes) se vérifia suffisamment dans les années 1970 pour que la théorie du big bang ne soit plus remise en question. De plus, ce succès renforça la coopération entre cosmologie et physique des particules, appuyant l'idée que l'Univers est « l'accélérateur de particules du pauvre », selon une expression attribuée à Zel'Dovich⁵.

C'est dans ce contexte que S. Weinberg publia en 1972 son manuel de cosmologie⁶ qui fut l'un des manuels de référence en langue anglaise, notamment pour les physiciens des particules voulant se former aux sujets cosmologiques (comme ce fut le cas d'A. Guth et de Paul Steinhardt, deux des fondateurs de la théorie de l'inflation). Le modèle d'Univers issu du big bang y est présenté comme le « modèle standard de la cosmologie ». Même si tous les physiciens et astronomes de l'époque n'acceptaient pas la théorie du big bang, ceux qui travaillaient dans le cadre de cette théorie acceptaient les principaux traits de ce modèle standard :

- La métrique de l'Univers est celle de Robertson-Walker (courbure constante et distribution de matière homogène) avec une courbure $k \simeq 0$.
- L'expansion de l'Univers est décrite par l'équation de Friedmann-Lemaître avec $\Lambda = 0$ et des conditions aux limites sur l'énergie de l'Univers : $\rho \geq 0$ et $\rho + 3p \geq 0$.
- L'Univers à $t = 0$ est une *singularité*, la *nucléosynthèse primordiale* a lieu pendant les premières minutes de l'Univers, puis la densité est suffisamment faible pour qu'une première lumière puisse être émise (ce phénomène est appelé le *découplage matière/rayonnement*), lumière qui est à l'origine du fond diffus cosmologique. L'expansion de l'Univers se ralentit peu à peu depuis cette époque.

Le modèle standard a rencontré un certain nombre de problèmes dans les années 1970, mais grâce à ses succès et à sa capacité prédictive il ne fut pas remis en question pour autant.

⁵Voir à ce sujet LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 41.

⁶WEINBERG, *Gravitation and cosmology : principles and applications of the general theory of relativity*.

5.1.2 Les problèmes du modèle standard

On peut classer les problèmes rencontrés par le modèle standard en deux catégories : les problèmes *fondamentaux*, qui se posaient déjà avant la théorie du big bang et les *énigmes (puzzles)*, des faits qui apparaissent comme des coïncidences peu admissibles dans le cadre de cette théorie et qui semblent menacer sa cohérence logique.

Il y a deux problèmes fondamentaux : le problème de la singularité et celui de l'origine des structures. *Le problème de la singularité* consiste à se demander comment décrire l'Univers jeune de moins de 10^{-12} secondes et d'une température $\simeq 10^{28}$ K ? S. Hawking, G. Ellis et R. Penrose avaient démontré à la fin des années 1960 que pour une grande classe de modèles d'Univers, les équations de la relativité générale mènent à des singularités, c'est-à-dire à l'existence de points où cette théorie n'est plus applicable. Serait-il préférable de trouver des modèles d'Univers sans singularité ? Jusqu'à quel point alors peut-on extrapoler la relativité générale et la mécanique quantique, sachant que ces théories ne sont pas compatibles pour des échelles et des températures comme celles de la naissance de l'Univers ? Ce problème est lié à la physique de particules et notamment au développement des *Grand Unified Theories* (GUT) cherchant à unifier toutes les interactions physiques.

Le problème de l'origine des structures pour sa part, consiste à trouver le mécanisme par lequel se sont formées les structures de notre Univers, c'est-à-dire les étoiles, les galaxies et les amas de galaxies. Dans le modèle standard, les contrastes de densité de matière dans l'Univers augmentent proportionnellement à $t^{2/3}$ durant la phase de domination de la matière. Ce taux amène, pour l'époque actuelle, à des contrastes de l'ordre de 10^{12} alors que les contrastes observés sont de l'ordre de 10^{40} . Dans son manuel de 1972, S. Weinberg remarque ainsi : « nous n'avons toujours pas ne serait-ce qu'une tentative de théorie quantitative de la formation des galaxies, qui soit aussi complète et plausible que nos théories sur l'origine du fond diffus cosmologique ou des abondances cosmiques d'hélium »⁷.

À ces problèmes fondamentaux de la cosmologie se rajoutent de nom-

⁷WEINBERG, *Gravitation and cosmology : principles and applications of the general theory of relativity*, p. 562.

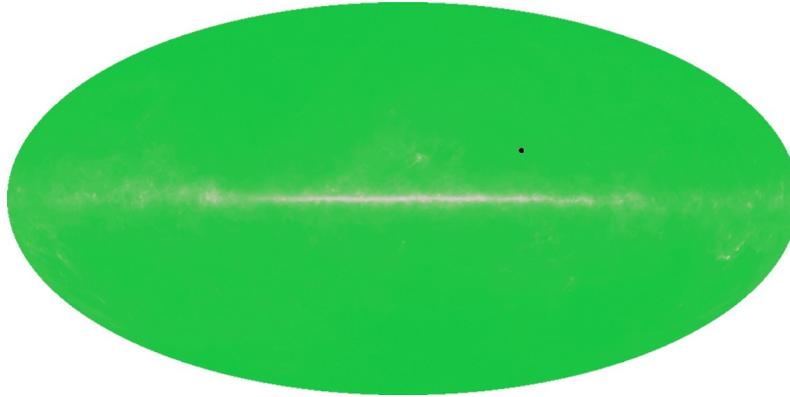


FIGURE 5.1 : La figure représente les différences de température de l'ordre du kelvin dans le fond diffus cosmologique (la bande blanche centrale est l'axe de la voie lactée). À cette échelle de température il semble parfaitement homogène. Et pourtant chaque point du fond diffus cosmologique n'a pu être en contact causal depuis l'origine de l'Univers qu'avec une petite région de l'Univers global. Cet horizon d'environ 2 degrés correspond au disque noir représenté sur la figure.

breuses *énigmes* du modèle standard, dont deux sont particulièrement importantes pour la théorie de l'inflation : l'énigme de l'horizon et l'énigme de la courbure. L'*énigme de l'horizon* repose sur le fait que le fond diffus cosmologique semble avoir la même température quelle que soit la direction du ciel que l'on observe : il est isotrope. Mais cette isotropie est surprenante, car ces régions du fond diffus cosmologique sont tellement éloignées qu'elles n'ont pas pu être en contact depuis la naissance de l'Univers. En effet, la vitesse de la lumière étant une vitesse limite maximale et finie, on peut calculer, pour chaque point du fond diffus cosmologique, avec quels autres points il a eu le temps d'être mis en relation depuis le début de l'Univers : c'est ce que l'on appelle son horizon causal. L'horizon d'un point du fond diffus cosmologique correspond à un cercle centré sur lui d'environ 2 degrés de rayon⁸.

Il est donc très surprenant que tous les points du fond diffus cosmologique aient approximativement la même température. Est-ce que ces différentes régions ont évolué sans contact et abouti, par coïncidence, à la

⁸Voir figure 5.1 pour une illustration et l'annexe du chapitre 5 pour le calcul de cet horizon.

même température ? Ou est-ce que les conditions initiales de l'Univers, au moment du big bang, étaient si finement ajustées que l'évolution subséquente de l'Univers ne pouvait qu'aboutir à une telle homogénéité ? Cette énigme connue sous le nom d'énigme de l'horizon (*horizon problem*) fut posée dès 1969 par Charles Misner afin de promouvoir un modèle alternatif dans lequel ce problème n'apparaît pas : l'Univers « mixmaster »⁹.

La deuxième énigme du modèle standard qui eut de l'importance dans le développement de la théorie de l'inflation est celle de *la courbure nulle*. Comment expliquer que l'Univers soit si plat ? Le fait que l'Univers ait un espace de courbure proche de zéro est surprenant parce qu'il s'agit d'une situation *instable*. En effet, l'équation de Friedmann-Lemaître montre que la courbure de l'Univers est reliée à sa densité et à son expansion. On peut ainsi démontrer que la valeur de la courbure évolue avec le temps et s'éloigne progressivement de $k = 0$ (voir l'annexe au chapitre 5 pour la démonstration). Il aurait fallu que la densité initiale de l'Univers ait été très proche d'une certaine densité critique pour que la courbure de l'Univers soit toujours nulle. Ce problème, qui concerne comme l'énigme de l'horizon les conditions initiales de l'Univers, est connu sous le nom de *Flatness problem* et est exposé dans un article de Dicke et Peebles en 1979 (même si d'après Dicke, il l'avait déjà discuté dans une intervention à l'American Philosophical Society en 1969¹⁰).

Le problème de l'origine des structures est un problème pour toute théorie cosmologique : même la théorie de l'état stationnaire s'y était confronté. C'est un problème *externe* à la théorie du big bang, qui concerne tous les modèles cosmologiques et l'astrophysique des galaxies. De même, le problème de la singularité vaut pour toute description de l'Univers qui se base sur les équations de la relativité générale. En revanche, les énigmes de l'homogénéité et de la courbure sont des problèmes *internes* à la théorie du big bang puisqu'elles n'apparaissent que si l'on interprète le fond diffus cosmologique dans le cadre du modèle standard, c'est-à-dire

⁹Charles MISNER, "Mixmaster universe", *Physical Review Letters* 22.20 (1969), p. 1071–1074.

¹⁰Robert DICKE, "Gravitation and the Universe", *Memoirs of the American Philosophical Society, Jayne Lectures for 1969*, t. 1, Philadelphia, American Philosophical Society, 1970.

comme la première lumière de l'Univers¹¹.

Or, c'est pour résoudre les problèmes internes à la théorie du big bang qu'est apparue la théorie de l'inflation. Elle semble donc avoir été introduite non pas sur la base de nouvelles découvertes empiriques ou pour prédire de nouveaux phénomènes, mais pour empêcher le modèle du big bang d'être incohérent. Cela signifie-t-il que les prédictions n'ont joué aucun rôle dans le développement de la théorie de l'inflation ? Dans la section suivante, je montre que le pouvoir prédictif de l'hypothèse de l'inflation a été fortement débattu durant les années 1980 et que ces débats confirment que le pouvoir prédictif d'une théorie est un critère important dans son évaluation par une communauté scientifique.

5.2 Le problème du pouvoir prédictif de la théorie de l'inflation dans les années 1980

5.2.1 Les premiers développements de la théorie de l'inflation au début des années 1980

Si l'on définit l'inflation comme une phase d'expansion exponentielle dans l'Univers primordial (durant sa première seconde et avant la nucléosynthèse primordiale), alors il faut reconnaître, avec l'historien Chris Smeenk¹², que le premier modèle d'inflation n'est pas dû au physicien états-unien A. Guth, mais aux cosmologistes russes de l'université de Moscou.

Dès 1979, A. Starobinsky, un élève de Zel'dovich, proposa ainsi un modèle d'Univers avec « une phase de de Sitter »¹³, c'est-à-dire une période d'expansion exponentielle semblable à celle qu'avait décrite de Sitter dans son modèle cosmologique. Pour A. Starobinsky, cette expansion n'est pas

¹¹Lorsqu'on demanda à Hoyle en 1989 s'il considérait que le problème de la courbure était grave, il répondit ainsi : « Eh bien, j'ai l'impression que ce n'est pas réellement mon problème. C'est un problème pour les gens qui développent le scénario du big bang » LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 62.

¹²Chris SMEENK, "False vacuum : Early universe cosmology and the development of inflation", *The universe of general relativity*, Springer, 2005, p. 223–257.

¹³Alexei STAROBINSKY, "A new type of isotropic cosmological models without singularity", *Physics Letters B* 91.1 (1980), p. 99–102, p. 100.

réellement une phase mais est illimitée dans le passé : il s'agit de l'état originare de l'Univers, subissant par la suite l'expansion du modèle standard. C'est ainsi qu'il évite la singularité initiale. De plus, comme il le fait remarquer dans l'article en anglais qui suit d'une année ses publications en russe, ce modèle produit des prédictions testables :

La propriété importante de tous les modèles sans singularité avec un état initial superdense de de Sitter, est qu'une telle quantité d'ondes gravitationnelles est générée que les prédictions de la théorie semi-classique et l'existence même de cette phase pourra être vérifié dans un proche futur¹⁴.

Si cette prédiction est la première tirée de la théorie de l'inflation, c'est qu'elle en est une des conséquences les plus directes. En effet, une expansion exponentielle de l'Univers créerait une telle perturbation du champ gravitationnel que celui-ci vibrerait sous formes d'ondes gravitationnelle. Cette prédiction peut être tirée de quasiment tous les modèles d'Univers avec expansion exponentielle, notamment les plus simples. Cela en fait une prédiction *robuste* et donc un test crucial de cette théorie, comme l'était la prédiction du fond diffus cosmologique pour les modèles d'Univers en évolution. Elle suffit à montrer que la théorie de l'inflation a bien un *pouvoir* prédictif, c'est-à-dire peut fixer théoriquement des grandeurs observables. Elle n'est en revanche pas suffisante pour montrer que cette théorie a une *capacité* prédictive, car malgré l'optimisme d'A. Starobinsky, la détection des ondes gravitationnelles produite par l'inflation s'avère extrêmement difficile et aucune méthode de détection n'a encore fait ses preuves.

Mais cette prédiction n'a eu que peu d'influence pour une autre raison : le modèle de Starobinsky tomba dans l'oubli pendant la décennie 1980. La théorie de l'inflation ne trouva son nom et ne se développa qu'un an après la publication des travaux d'A. Starobinsky, avec les recherches d'un physicien des particules états-unien, A. Guth.

La théorie de l'inflation proposée par A. Guth répond à un autre cahier des charges que celle de Starobinsky : elle ne s'attaque pas au

¹⁴STAROBINSKY, "A new type of isotropic cosmological models without singularity", p. 101.

problème de la singularité mais aux énigmes de la courbure et de l'homogénéité.

Selon le récit qu'il fit, rétrospectivement, de la formulation sa théorie, A. Guth aurait d'abord développé avec Henry Tye l'idée d'une phase d'expansion exponentielle de l'Univers alors qu'il était en post-doc à l'Université de Cornell et travaillait sur une des versions des GUT, qui prédisaient la synthèse d'une abondance énorme de monopôles¹⁵. Aucune particule de ce genre n'ayant été observée, Guth et Tye supposèrent que la densité des monopoles avait été diluée de manière drastique par une augmentation exponentielle du facteur d'échelle de l'Univers peu après le big bang¹⁶.

En 1979, il assista à une conférence de Dicke et J. Peebles où ils exposaient le problème de la courbure nulle et en janvier 1980 il prit connaissance du problème de l'horizon. Il eut alors l'intuition qu'une hypothèse d'une phase d'expansion exponentielle de l'Univers pouvait aussi apporter une réponse à ces énigmes¹⁷. En effet, si l'Univers avait augmenté de taille à une vitesse très rapide entre sa naissance et le découplage matière/rayonnement¹⁸, cela expliquerait non seulement pourquoi sa courbure est proche de zéro (voir figure 5.2) mais aussi pourquoi toutes les régions du fond diffus cosmologique ont la même température : ces régions auraient bien été en contact causal avant l'inflation, mais celle-ci les aurait écarté au-delà de leur horizon.

En janvier 1981, A. Guth publia un article dans la *Physical Review D* dans lequel il proposa un scénario d'Univers « inflationniste ». Cet article s'ouvre ainsi sur l'énoncé de ces deux problèmes, l'énigme de l'horizon étant décrite comme « bien connue » tandis que celle de la courbure nulle est considérée comme « bien moins célèbre »¹⁹. L'article d'A. Guth

¹⁵Les monopôles sont des particules hypothétiques porteuses d'une charge magnétique ponctuelle, c'est-à-dire constituant un pôle magnétique nord ou sud isolé.

¹⁶LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 473.

¹⁷LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 473.

¹⁸Le découplage matière/rayonnement est le moment de l'histoire de l'Univers où sa densité fut suffisamment faible pour que les photons puissent s'échapper de la matière. C'est donc à l'instant de ce découplage que fut émis la première lumière de l'Univers, que l'on reçoit aujourd'hui sous la forme du fond diffus cosmologique.

¹⁹Alan GUTH, "Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems", *Physical Review D* 23.2 (1981), p. 347, p. 347.

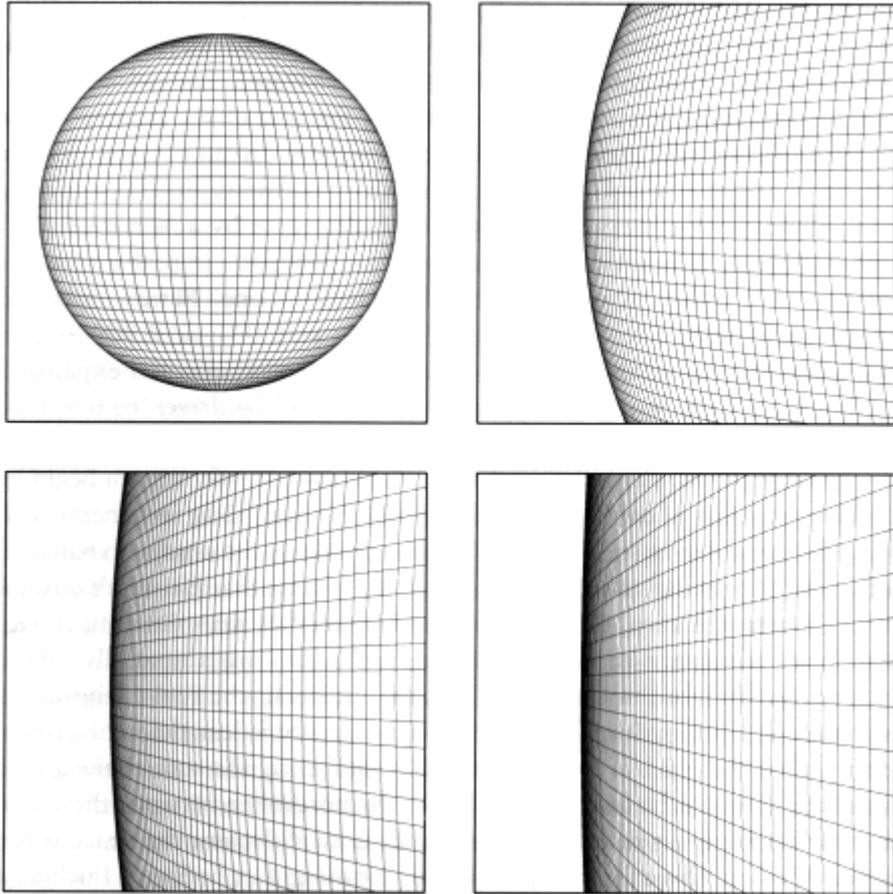


FIGURE 5.2 : Si dans une région de l'Univers l'espace a une courbure positive (en haut à gauche), une expansion importante du facteur d'échelle fait tendre asymptotiquement cette courbure vers 0 dans cette région (en bas à droite). Le même raisonnement est applicable au cas où l'espace aurait initialement une courbure négative.

consiste ensuite à formuler ces problèmes dans le cadre du modèle standard, en s'appuyant en grande partie sur le manuel de S. Weinberg mentionné ci-dessus, afin de proposer de le modifier de la manière suivante : si l'Univers se refroidit et connaît une transition de phase durant son expansion, il est possible que certaines régions qu'il nomme des « bulles » connaissent une « surfusion » à cause d'un champ scalaire associé au boson de Higgs. La surfusion est un état métastable dans lequel se retrouve un système gazeux ou liquide lorsque sa température T est inférieure à sa température de condensation ou de solidification T_c . Quand une perturbation fait sortir ce système de cet état, une chaleur latente est diffusée qui le réchauffe à une température T_r comparable à T_c . Dans le cas de l'Univers, « Si l'Univers refroidit en surfusion d'un facteur d'ordre 28 ou plus en dessous d'une certaine température critique, alors les problèmes de l'horizon et de la courbure nulle disparaissent »²⁰.

A. Guth suppose ensuite que lorsque l'Univers est en surfusion, son expansion est dominée par une énergie du vide de densité ρ_{vac} qu'il identifie à la constance cosmologique Λ . Or, lorsque Λ est le terme dominant de l'équation de Friedmann-Lemaître, cela implique que :

$$R'(t) \propto R(H(t))$$

La solution d'une telle équation différentielle est une fonction exponentielle : l'Univers connaît donc, durant la phase de surfusion, une expansion exponentielle, qu'A. Guth nomme (en référence, d'après son témoignage, aux soucis économiques de la présidence Carter) une phase d' « inflation ». Ce scénario résout les problèmes de la courbure et de l'horizon mais aussi le problème des monopôles, parce que leur nombre est comparable à celui des bulles d'Univers et ne devraient donc pas être plus que quelques unités dans l'Univers observable.

Cette théorie de l'inflation a donc le mérite de résoudre trois problèmes à l'aide d'un seul mécanisme. Mais aucun de ces trois problèmes n'est un problème *externe*, c'est-à-dire qui concernerait aussi ceux qui ne tiennent pas pour vraies la théorie du big bang ou la version des GUT

²⁰GUTH, "Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems", p. 350.

sur laquelle travaillait A. Guth. Ainsi, l'hypothèse de l'inflation, dans l'article d'A. Guth, apparaît comme une manière de sauver à la fois la théorie du big bang et la théorie GUT. Que cela soit possible en ne supposant qu'un seul mécanisme est un succès impressionnant qui explique la rapide diffusion de la théorie d'A. Guth. Mais A. Guth, à la différence d'A. Starobinsky, ne propose aucune prédiction testable à partir de son hypothèse de l'inflation.

De plus, malgré son succès, la théorie de l'inflation ainsi formulée mène à un problème remarqué par A. Guth dans la dernière section de son article : toute l'énergie latente de la transition de phase est transférée aux parois des bulles et n'est thermalisée que lorsque ces bulles entrent en collision. Ces collisions auraient laissé des traces dans le fond diffus cosmologique, qui devrait donc être bien moins homogène que ce qui était observé à l'époque.

Malgré ce problème, Leonard Susskind et Sidney Coleman (1937-2007), deux physiciens de l'accélérateur de particules de Stanford furent enthousiasmés par la théorie de l'inflation et œuvrèrent activement à sa diffusion, ce qui mena en 1982 au premier atelier sur « le très jeune Univers ($t < 1$ sec) »²¹ qui eut lieu du 21 juin au 9 juillet à Cambridge. Le problème des inhomogénéités dues au taux d'apparition des bulles fut l'un des problèmes les plus étudiés. Cet atelier amena à ce que J. Barrow et M. Turner appelèrent peu après, dans un article de *Nature* destiné à couvrir les conférences²², la « mort et la transfiguration de l'inflation », c'est-à-dire une nouvelle théorie de l'inflation, cohérente avec l'homogénéité du fond diffus cosmologique, mais dont le mécanisme ne correspond à aucun champ connu, nommé « inflaton » .

La nouvelle théorie de l'inflation fut proposée par A. Albrecht et

²¹La liste des participants regroupe la majeure partie des groupes de scientifiques se consacrant à la théorie de l'inflation : D. Sciama, G. Ellis, S. Hawking, Albert Albrecht, Paul Steinhardt, John Barrow, Andreï Linde, Michael Turner. Ce petit aperçu de la liste des invités montre à quel point l'hypothèse s'est rapidement répandue, aussi bien auprès de physiciens déjà très versés dans les problèmes cosmologiques comme J. Barrow et S. Hawking, qu'auprès de jeunes physiciens des particules n'ayant quasiment aucune recherche en cosmologie, comme P. Steinhardt.

²²John BARROW et Michael TURNER, "The Inflationary Universe. Birth, death and transfiguration", *Nature* 298 (1982), p. 801–805.

P. Steinhard d'un côté²³ et par A. Linde de l'autre²⁴ — qui avait lui aussi travaillé sur des modèles d'Univers en expansion exponentielle à l'Université de Moscou avant la publication d'A. Guth. A. Linde fit remarquer que le problème de l'homogénéité du fond diffus cosmologique pouvait être évité si « la thermalisation ne se produit plus par la collision des parois [des bulles] mais par les interactions des particules créées par le champ homogène classique ϕ »²⁵. Le problème est que ce champ ϕ qui remplace le champ du boson de Higgs utilisé par A. Guth n'était pas — et n'est toujours pas — identifiable au champ scalaire d'une particule du modèle standard de la physique des particules. Mais si le champ scalaire responsable de l'inflation ne correspond à aucune particule connue, alors l'hypothèse de l'inflation n'avait plus aucune autre raison d'être que le fait de résoudre les énigmes de l'horizon et de la courbure. Or le fait que la résolution de ces problèmes constitue un authentique succès ne faisaient pas consensus parmi les cosmologistes.

5.2.2 La théorie de l'inflation a-t-elle un pouvoir prédictif ?

De nombreux débats philosophiques sur les prédictions exposés dans la première et troisième partie de cette thèse tournent autour de la question de savoir s'il faut qu'un phénomène soit *inconnu* au moment où la théorie qui le prédit a été formulée pour que l'on ait affaire à une authentique prédiction. Or, la première surprise que l'on a en étudiant les critiques que la communauté scientifique a adressées à la théorie de l'inflation est qu'*aucune* ne consiste à diminuer le succès de cette théorie en affirmant qu'elle ne fait que résoudre des problèmes connus *avant* sa formulation et que donc celle-ci a été construite pour y répondre. En effet, à ma connaissance, aucun cosmologiste n'a soulevé cette objection contre la théorie de

²³Albert ALBRECHT et Paul STEINHARDT, "Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking", *Physical Review Letters* 48 (1982), p. 1220.

²⁴Andrei LINDE, "A new inflationary universe scenario : A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems", *Physics Letters B* 108.6 (1982), p. 389–393.

²⁵LINDE, "A new inflationary universe scenario : A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems", p. 391.

l'inflation, que ce soit dans des articles scientifiques, philosophiques, de vulgarisation ou des interviews. Il est possible que la plupart partagent l'opinion qu'exprime S. Weinberg lorsqu'on lui demande si la théorie de l'inflation a bien réalisé des prédictions :

Ce n'est pas juste de dire que l'inflation n'a fait aucune nouvelle prédiction. Très souvent, les théories sont testées en les utilisant pour expliquer des faits déjà connus. Après tout, lorsque Newton calcula la durée du mois en utilisant l'accélération de la gravité à la surface de la Terre et la distance de la Lune, c'était [un résultat] déjà connu, mais il s'agissait d'une si bonne preuve numérique, que c'était clairement convaincant²⁶.

Il semble donc que l'usage du terme « prédiction » dans la bouche des cosmologistes de cette période recouvre des cas où le phénomène prédit est connu antérieurement à la prédiction. Ce que suggère la citation de S. Weinberg ci-dessus, c'est que c'est un rapport *logique* (un « si bon et efficace calcul ») et non *temporel* qui caractérise la relation entre un phénomène et la théorie qui le prédit. En montrant que l'on pouvait calculer la durée du mois à partir de l'accélération à la surface de la Terre et de la distance de la Lune, Newton aurait ainsi montré que *même si la durée du mois était inconnue*, on pourrait la fixer théoriquement — la prédire — grâce à sa théorie.

De même, lorsque le cosmologiste G. Ellis et le physicien Tony Rothman dressèrent en 1987 une liste d'objections contre la théorie de l'inflation²⁷, ils ne critiquent pas le fait que cette théorie *prédise* la courbure nulle de l'Univers, mais que l'Univers *ait* bien une courbure nulle.

En effet, G. Ellis et T. Rothman considèrent que les problèmes de la courbure et de l'horizon sont des problèmes « métaphysiques » uniquement liés à la définition des conditions initiales de l'Univers. Mais ils admettent que ces énigmes constituent quand même des problèmes sérieux et qu'une réponse *physique* à ces problèmes serait souhaitable. Ils

²⁶LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 458.

²⁷Tony ROTHMAN et George ELLIS, "Has cosmology become metaphysical?", *Astronomy* 15 (1987), p. 6–21.

ne considèrent donc pas que la théorie de l'inflation, même si elle répond à des énigmes métaphysiques, soit, elle, métaphysique, car elle mène bien à *une* (mais unique) prédiction : celle de la courbure nulle de l'Univers²⁸. Or, cette prédiction s'avère, pour G. Ellis et T. Rothmann être réfutée parce que les observations en 1987 plaident pour un Univers ouvert (c'est-à-dire de courbure négative).

La stratégie argumentative de G. Ellis et T. Rothman est habile : elle consiste à minimiser la fécondité des prédictions de la théorie de l'inflation, en montrant qu'elle ne réalise pas des prédictions de phénomènes variés, mais bien une seule et unique prédiction, formulée deux fois différemment. Le revers de cette stratégie est qu'elle n'est efficace que si, *de facto*, la prédiction de la courbure nulle de l'Univers est bien invalidée par les observations, ce qui semblait être le cas dans les années 1980 à partir des estimations de la densité de l'Univers mais qui fut remis en question dans les années 1990²⁹

Ainsi, ce n'est pas parce que la théorie de l'inflation traitait des problèmes déjà connus qu'elle fut attaquée comme incapable de réaliser d'authentiques prédictions testables empiriquement. Le reproche qui lui a été adressé, notamment par ceux qui en ont été les fondateurs, est qu'elle peut être déclinée en un grand nombre de versions (modèles), ce qui en fait une théorie potentiellement irréfutable, incapable de réaliser des prédictions robustes.

Dès le milieu des années 1980, de nombreux modèles différents d'inflation virent le jour. En effet, puisque le champ scalaire responsable de cette expansion n'était pas contraint par la physique des particules, il était possible de fixer son intensité et son étendue de manière arbitraire

²⁸En effet, selon eux, les énigmes de la courbure et de l'horizon étant toutes deux des problèmes liés aux conditions initiales de l'Univers, ce ne sont pas des énigmes indépendantes.

²⁹Ces arguments sont souvent présentés sous des formes proches par d'autres physiciens, dans des ouvrages de vulgarisation, notamment celui d'A. Guth (Alan GUTH, *The Inflationary Universe : The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Vintage, 1998). Ils n'ont en aucune manière freiné la recherche scientifique sur les modèles d'inflation, mais ils sont cités dans les manuels d'introduction à l'inflation et ont pu influencer les recherches des années 1990 qui se sont orientées vers d'autres problèmes que ceux de l'horizon et de la courbure.

et même de cumuler plusieurs champs scalaires³⁰, pour obtenir différents scénarii d'inflation. À chaque version différente du champ scalaire correspondait un modèle différent de la théorie de l'inflation et des prédictions différentes sur les paramètres observables de l'Univers.

Ainsi, pour D. Sciama, à la fin des années 1980, la théorie de l'inflation était entrée dans sa « période baroque »³¹, tandis qu'A. Guth considérait que parmi les trois mille articles sur l'inflation qui ont été publiés entre 1981 et 1997 on peut trouver plus de cinquante modèles différentes³². La multiplication des modèles d'inflation jeta un soupçon sur le pouvoir prédictif de cette théorie. Certains cosmologistes posèrent une question qui n'avait pas encore été abordée : qu'est-ce qu'une prédiction réellement risquée pour une théorie, c'est-à-dire ayant le pouvoir de la réfuter ? Autrement dit, est-ce qu'une théorie a réellement un pouvoir prédictif si l'on peut inventer autant de modèles de cette théorie que l'on en a besoin pour l'ajuster aux données d'observation ?

Pour deux des pères fondateurs de la « nouvelle inflation » — A. Linde et P. Steinhardt — la théorie de l'inflation était devenue *irréfutable* dans les années 1980 à cause de cette prolifération de modèles, ce qui les amena à proposer des hypothèses alternatives. A. Linde, en 1996, lors d'une table ronde du colloque « Critical Dialogues in Cosmology » à Princeton, a ainsi soutenu qu'

Il est possible de vérifier et d'infirmer de nombreux modèles d'inflation, mais qu'il est très difficile de tuer l'idée basique de l'inflation. Il semble que la meilleure (et peut-être la seule) chose à faire est de suggérer une meilleure théorie cosmologique »³³.

Selon lui, puisque nous disposons de modèles d'inflation qui aboutissent à un Univers de courbure positive, il est tout à fait possible de sauver

³⁰À partir du milieu des années 1990 sont apparus des modèles dits « hybrides » dans lesquels plusieurs champs combinent leurs effets. Voir LITTLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.

³¹LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 148.

³²GUTH, *The Inflationary Universe : The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, p. 278.

³³Andrei LINDE, «Prospects of inflationary cosmology», *arXiv preprint astro-ph/9610077* (1996), p. 1.

l'hypothèse d'une expansion exponentielle de l'Univers même si les observations montrent que la courbure de l'Univers est différente de zéro. De même, si l'on essaye de comparer les modèles d'inflation avec les perturbations du fond diffus cosmologique³⁴ :

À nouveau, il est possible de confirmer les modèles inflationnistes parce que la plupart prédisent des perturbations ayant des propriétés spécifiques. Cependant, si jamais les perturbations inflationnistes sont en conflit avec les données observables, alors on peut facilement proposer un modèle inflationniste qui résout les problèmes d'homogénéité, d'isotropie et autre, mais qui produit de très faibles densités de perturbations³⁵.

Malgré ces remarques, A. Linde n'a pas rejeté la théorie de l'inflation dans son ensemble mais a développé une théorie de l'inflation qui lui est propre, celle de l'inflation chaotique³⁶, qui n'échappe pourtant pas à la critique d'irréfutabilité qu'il adresse à la théorie de l'inflation. Ce qui semble fondamental, pour A. Linde, est que l'on puisse discriminer parmi les modèles d'inflation tant que l'on ne dispose pas de meilleure théorie cosmologique des premiers instants de l'Univers.

P. Steinhardt, de son côté, a soutenu que la multiplication des modèles d'inflation soulève le problème suivant : les paramètres de la théorie de l'inflation doivent être fixés de manière arbitraire afin de répondre aux énigmes de la courbure et de l'horizon. À partir du début des années 2000, P. Steinhardt a en effet commencé à critiquer la théorie de l'inflation et à proposer un modèle concurrent, cyclique, développé avec Neil Turok de l'Université de Johannesburg³⁷. Une des contraintes sur le scénario de l'inflation est que si l'Univers reste trop longtemps dans un état de surfusion, cela engendrerait de grandes fluctuations de températures que l'on devrait repérer dans le fond diffus cosmologique (c'est le problème dit de la *grateful exit*). Pour éviter cela, il faut que l'inflation soit dirigée

³⁴On décrit dans la section suivante ce type de prédictions

³⁵LINDE, "Prospects of inflationary cosmology", p. 8.

³⁶Andrei LINDE, "Chaotic inflation", *Physics Letters B* 129.3 (1983), p. 177–181.

³⁷Justin KHOURY et al., "Ekpyrotic universe : Colliding branes and the origin of the hot big bang", *Physical Review D* 64.12 (2001).

par un paramètre qui doit être ajusté très précisément pour éviter ces fluctuations et sur lequel ne pèse aucune contrainte observationnelle³⁸. L'inflation serait donc sauvée, selon P. Steinhardt, par une manœuvre *ad hoc*. De plus, cela impliquerait que les états initiaux de l'Univers pouvant donner naissance à cette « bonne inflation » sont encore moins nombreux que ceux qui mènent d'eux-mêmes, par une évolution ne passant par aucune expansion exponentielle, à un Univers plat et homogène.

Ces critiques de P. Steinhardt et A. Linde mettent non seulement l'influence constante du critère de Popper en cosmologie par Hoyle, Bondi et Gold, mais aussi l'attention portée au pouvoir prédictif de la théorie de l'inflation. Ce que remettent en cause A. Linde et P. Steinhardt, c'est la capacité de la théorie de l'inflation à faire une prédiction commune à toutes ses versions, parce que seule une telle prédiction pourrait la réfuter.

Cette situation amena Popper lui-même à prononcer un jugement très tranché sur la cosmologie dans son ensemble. L'historien de la cosmologie H. Kragh, après avoir consacré plusieurs articles aux rapports entre la philosophie de Popper et la cosmologie, lui a envoyé une lettre en 1994, peu de temps avant sa mort, pour lui demander son avis sur les derniers progrès de la cosmologie. Dans cette lettre, Popper affirme que son admiration pour les travaux de Friedmann ne l'empêche pas de considérer que la théorie moderne du big bang (le modèle standard de la cosmologie) n'est « pas de la science (d'après [s]a conception) » puisqu'elle

- (1) introduit une nouvelle hypothèse auxiliaire à chaque fois qu'une théorie est réfutée ;
- (2) se soutient mutuellement avec la théorie des particules – mais les critiques, les expériences critiques (= les tentatives de réfutations) sont ignorées³⁹.

L'avis de Popper émis dans cette lettre est cohérent avec son épistémologie, d'après laquelle on doit chercher à réfuter des théories plutôt qu'à les ajuster progressivement aux observations à l'aide d'hypothèses

³⁸Paul STEINHARDT, “L'inflation cosmique en débat”, *Pour La Science* (2014), p. 76.

³⁹Cité dans Helge KRAGH, “Karl Popper on physical cosmologies”, *Journal of History of Astronomy* 43 (2012), p. 347–350, p. 349

auxiliaires non réfutables. La théorie de l'inflation a donc dû lui apparaître comme une telle tentative, inspirée par la physique des particules, pour échapper à la réfutation. La méthodologie de Popper supposerait au contraire que les énigmes de la courbure et de l'horizon redonnent leur chance à des théories alternatives à celle du big bang, comme une théorie de l'état stationnaire modifiée, puisque selon lui la confrontation de théories rivales est l'aiguillon qui pousse les expérimentateurs à découvrir de nouveaux faits et donc à faire progresser la connaissance scientifique.

Ainsi, les critiques sur la réfutabilité de la théorie de l'inflation pouvaient aboutir à une condamnation globale de la théorie du big bang, accusée d'être elle-même irréfutable. Le pouvoir prédictif de la théorie de l'inflation et du big bang a donc bien été considéré comme l'un des critères que les cosmologistes utilisent pour évaluer une nouvelle théorie. Dans la section suivante je montre que c'est lorsque la théorie de l'inflation a réussi à prouver que sa capacité prédictive ne se limitait pas aux deux énigmes de la courbure et de l'horizon qu'elle est devenue une théorie consensuelle.

5.3 Le développement de la capacité prédictive de la théorie de l'inflation dans les années 1990

5.3.1 La révolution COBE et la prédiction des anisotropies

Durant les années 1980, même si une partie des cosmologistes semblaient considérer l'inflation comme un sujet de recherche sérieux et publièrent de nombreux articles consacrés au sujet, l'absence d'autres tests que les problèmes de courbure et d'horizon aurait pu être fatale à cette théorie. Cela aurait en effet indiqué qu'elle n'avait pas une importante capacité prédictive, voire aucun pouvoir prédictif.

Mais, entre les années 1990 et les années 2000, la situation changea radicalement avec l'obtention de nouvelles données sur le fond diffus

cosmologique, données en grande partie récoltées par le satellite COBE (Cosmic Background Explorer).

Mis en orbite le 18 novembre 1989, COBE fut le premier satellite scientifique consacré à l'observation cosmologique. Il emporta trois instruments : FIRAS, un spectrophotomètre qui servit à étudier le spectre du fond diffus cosmologique, DMR, un ensemble de radiomètres et DIRBE, un photomètre opérant dans l'infrarouge lointain.

La première mission de COBE fut, grâce à FIRAS, de vérifier la nature de corps noir du spectre du fond diffus cosmologique. Peu de temps auparavant, en 1987, une équipe de chercheurs de Berkeley et de l'Université de Nagoya avaient repéré, lors d'une expérience embarquée, des irrégularités aux longueurs d'onde de $0,5$ et $0,7\text{mm}$. Cela montre que la nature et l'interprétation du fond diffus cosmologique était toujours en débat avant le lancement de COBE. L'extrême précision des données de FIRAS et leur ajustement quasi-parfait à la courbe d'un corps noir, fut l'un des succès prédictifs les plus importants et les plus frappants en faveur des modèles d'Univers en évolution. Il s'agit de la plus rigoureuse confirmation expérimentale de la prédiction de la théorie du big bang. Si elle vint bien après l'acceptation de cette théorie, elle ouvrit aussi de nouvelles perspectives.

En effet, les données récoltées par l'instrument DMR révélèrent que, conformément aux suppositions des cosmologistes dans les années 1970-1980, la température du fond diffus cosmologique n'est pas parfaitement uniforme : en certaines régions du ciel, le fond diffus cosmologique présente de petites variations de température (que l'on nomme « anisotropies ») dues à des fluctuations de densité de matière et d'énergie de l'Univers primordial. Ces petites perturbations, en s'accroissant sous l'effet de la gravitation, donnèrent naissance aux premières grandes structures — les étoiles et les galaxies. Ainsi, en 1992, les responsables de la mission COBE, John Mather et George Smoot publièrent la première carte des perturbations thermiques du fond diffus cosmologique, qui sont de l'ordre de quelques dizaines de μK , pour une température moyenne de $2,7K$ ⁴⁰

⁴⁰Ces fluctuations de température du fond diffus cosmologique sont donc très peu importantes, elles représentent l'équivalent de vaguelettes de $10^{-5}m$ dans une piscine d'un mètre de profondeur.

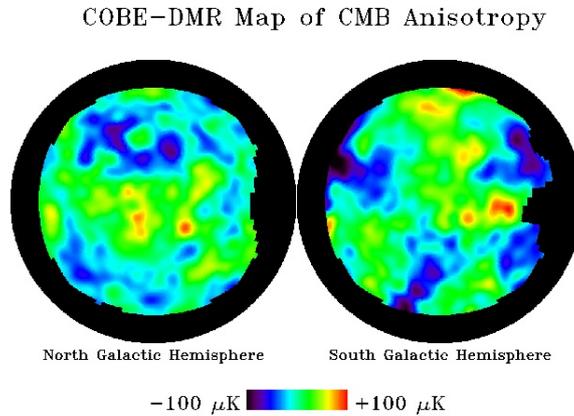


FIGURE 5.3 : La carte des anisotropies, entre $-100 \mu\text{K}$ et $+100 \mu\text{K}$ autour de $2,7\text{K}$, mesurées par l'instrument DMR de COBE. Les zones rouges indiquent les régions de sur-densité à l'origine des structures galactiques. Source : NASA.

(voir figure 5.3).

Les résultats de la mission COBE permirent ainsi non seulement à G. Smoot et J. Mather de recevoir un prix Nobel en 2006, mais aussi de recueillir des données comparables aux prédictions tirées des différents modèles d'inflation⁴¹.

La théorie de l'inflation peut en effet réaliser un certain nombre de prédictions sur la taille et l'amplitude des fluctuations qui apparaissent dans le fond diffus cosmologique. Avant l'inflation, l'Univers est à l'échelle subatomique. À cette échelle des fluctuations quantiques causées par la désintégration d'une paire particule/anti-particule apparaissent aléatoirement. L'expansion de l'Univers pendant l'inflation est suffisante pour que ces fluctuations quantiques soient étendues jusqu'à être macroscopiques, tout en conservant la même forme. D'autres fluctuations quantiques peuvent se rajouter à ces fluctuations de grande échelle et être elles aussi étendues, tant que l'Univers n'est pas sorti de l'inflation. Ce sont ces

⁴¹Voir l'annexe du chapitre 5 pour le détail technique des tests des prédictions de la théorie de l'inflation.

fluctuations quantiques étendues qui seraient à l'origine des anisotropies du fond diffus cosmologique.

Ainsi, tout modèle d'Univers qui incorpore l'hypothèse de l'inflation prédit que l'on devrait observer que les anisotropies du fond diffus cosmologique sont invariantes d'échelles, puisqu'elles sont toutes produites par des fluctuations quantiques plus ou moins étendues par l'expansion exponentielle de l'Univers primordial. De plus, ces perturbations devraient être à l'équilibre thermique. Ces deux prédictions ont été vérifiées, d'abord par COBE puis, avec plus de précisions, par son successeur WMAP lancé en 2001. Elles ont permis non seulement d'accroître la capacité prédictive de la théorie de l'inflation, mais aussi et surtout d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche dans un domaine qui restait jusque là mystérieux : l'origine des grandes structures de l'Univers.

5.3.2 L'inflation comme théorie des structures

Puisque la théorie de l'inflation permet de prédire à la fois la présence, mais aussi la taille et l'aspect de ces anisotropies, cette théorie fut progressivement appliquée à l'un des problèmes fondamentaux de la cosmologie : le problème de la formation des structures. Comme on l'a montré dans la première section du chapitre, ce problème est un problème *externe* à la théorie du big bang, c'est-à-dire qu'il se pose à toute théorie de l'Univers.

Cette situation mena certains cosmologistes, comme Andrew Liddle et David Lyth, à distinguer deux formulations de la théorie de l'inflation et à soutenir que l'authentique test de l'inflation est la prédiction des anisotropies du fond diffus cosmologique :

Ces problèmes [de l'horizon et de la courbure] ne peuvent plus être regardés comme la plus importante motivation pour la cosmologie inflationniste parce qu'il n'est pas sûr du tout qu'ils puissent être utilisés pour réfuter l'inflation. [...] Par contraste avec l'inflation comme théorie des conditions initiales, le modèle de l'inflation comme origine possible des structures dans l'Univers est fortement prédictif. Différents

modèles d'inflations mènent généralement à différentes prédictions concernant les structures observées et les observations peuvent discriminer strictement entre elles. L'inflation comme origine des structures est donc une science de prédictions et d'observation, méritant un examen détaillé⁴².

Pourquoi la théorie de l'inflation comme théorie de l'origine des structures est-elle plus « fortement prédictive » que la théorie de l'inflation comme « théorie des conditions initiales » ?

Dans le deuxième chapitre de la thèse (section 2.2), nous avons vu que certaines prédictions basées sur des modèles étaient appelées *robustes* parce qu'elles ne dépendent pas de la manière dont on fixe les paramètres de ces modèles, mais qu'elles résultent de la manière dont ce modèle est construit. C'est le cas avec les prédictions de l'équilibre thermique et de l'invariance d'échelle des fluctuations du fond diffus cosmologique : elles découlent « naturellement » de la théorie de l'inflation parce qu'elles ne nécessitent pas d'ajuster finement certains des paramètres des modèles d'inflation pour être déduites. Ainsi COBE a-t-il permis de tester un certain nombre de prédictions *robustes* faites par la théorie de l'inflation, c'est-à-dire de prédictions réalisées par l'ensemble des modèles d'inflation.

De plus, comme ces prédictions sont *robustes* parce qu'elles découlent d'un grand nombre de modèles d'inflation, il est possible de les utiliser pour *discriminer* parmi ces modèles. En effet, chaque modèle prédit une amplitude et une échelle quantitativement différente des anisotropies du fond diffus cosmologique. Il est donc possible de comparer ces prédictions aux mesures effectuées sur les cartes d'anisotropies du fond diffus cosmologique comme celle de COBE.

Ces prédictions ont donc joué un grand rôle dans l'acceptation de la théorie de l'inflation et le nouvel essor de recherches basées sur cette hypothèse, comme en témoigne le manuel d'A. Liddle et D. Lyth publié au début des années 2000 :

Bien qu'un grand nombre de sujets [cosmologiques] soient devenus matures dans les années 1980, si l'on jette un regard

⁴²LIDDLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, p. 5.

rétrospectif sur les articles de cette époque, on est frappé par la rareté des comparaisons détaillées avec les observations. Sous cet aspect, la cosmologie des années 1990 (et suivantes) est devenue un sujet très différent de ce qu'elle était durant les années 1980 car, pour la première fois, des observations de qualité pouvaient sérieusement contraindre certaines des théories physiques sur l'Univers jeune. Ces observations portent sur la structure de l'Univers et la première détection des anisotropies du fond de microondes [le fond diffus cosmologique] par le Cosmic Background Explorer (COBE), annoncée en 1992, a joué un rôle central. Il s'agissait des premières observations que l'on pouvait, plus ou moins directement, interpréter comme des contraintes sur la physique de l'Univers jeune⁴³.

Ainsi, ces prédictions *robustes* de la théorie de l'inflation étaient aussi des *prédictions fécondes* : la capacité prédictive de l'hypothèse de l'inflation était suffisante pour espérer qu'elle mènerait à de nouvelles découvertes et ainsi motiver de nouveaux programmes de recherches.

Prenons l'exemple du satellite COBE : n'ayant qu'une résolution de 7 degrés, il n'avait pu fournir des données que pour de grandes échelles angulaires⁴⁴. Mais l'intérêt de ces recherches pour développer la capacité prédictive de la cosmologie et de la théorie de l'inflation en particulier, fut suffisant pour qu'une deuxième mission (WMAP) soit mise en chantier et que diverses mesures soient effectuées à partir de ballons stratosphériques comme Maxima(1998-1999), BOOMERANG (1997-2003) et BICEPS (2015). Par la suite, d'autres missions spatiales comme celle du satellite Planck (2013) permirent de compléter ces études des anisotropies et de mieux contraindre les modèles d'inflation et les modèles cosmologiques en général, en permettant notamment de mesurer plus précisément la courbure de l'Univers. Ces différentes missions prouvent que la théorie de l'inflation est devenue une théorie capable de réaliser

⁴³LIDDLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, p. 1.

⁴⁴George SMOOT et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps", *The Astrophysical Journal* 396 (1992), p. L1-L5.

suffisamment de prédictions connectées aux observations pour avoir un rôle moteur dans le lancement de programmes de recherches demandant d'importants moyens financiers et humains.

Ce pari selon lequel la capacité prédictive de la théorie de l'inflation pouvait mener à de nouvelles prédictions fut rapidement payant. Le ballon de l'expérience BOOMERANG, par exemple, permit de cartographier les anisotropies du fond diffus cosmologique sur une petite région du ciel mais avec une meilleure résolution que COBE. Cette expérience montra que les prédictions des modèles d'inflation avec matière noire froide⁴⁵ étaient plus en accord avec les données d'observation que ceux qui n'incorporaient pas de matière noire ou de la matière noire chaude. En effet, sans matière noire froide (c'est-à-dire sans particules massives n'interagissant avec le reste de la matière que par l'interaction gravitationnelle), les contrastes de densité du fond diffus cosmologique ne seraient pas suffisamment importants pour permettre l'agrégation gravitationnelle à l'origine des premières grandes structures. La théorie de l'inflation a ainsi permis de contraindre la valeur de la masse et l'énergie de cette matière noire.

Le développement de la capacité prédictive de la théorie de l'inflation s'appuya donc, comme celui de la théorie du big bang avant elle, sur la collaboration de nombreuses disciplines avec la cosmologie, chacune bénéficiant des retombées de ces recherches. En mettant en lumière le rôle de la matière noire, nécessaire pour obtenir des puits de potentiel suffisamment profond pour prédire les anisotropies observées dans le fond diffus cosmologique, la cosmologie a rejoint les travaux d'astrophysique sur les premières galaxies. De plus, la théorie de l'inflation étant une théorie qui permet de sonder un état de l'Univers dans lequel la physique était celle de la gravitation quantique, elle est devenue une pièce majeure dans la recherche d'une théorie unifiant relativité générale et mécanique quantique.

Le jugement d'A. Liddle et D. Lyth semble donc bien refléter la réalité

⁴⁵La matière noire froide désigne des particules non baryoniques de masse importante (la matière noire) ayant des vitesses non relativistes. Ces particules n'ont pas été détectées autrement que par leur effet gravitationnel sur la matière baryonique, qui émet des rayonnements.

historique : c'est en devenant une théorie sur l'origine des structures de l'Univers et non en restant une théorie sur l'état initial de l'Univers, que la théorie de l'inflation a développé sa capacité prédictive et qu'elle est aujourd'hui au fondement de programmes de recherche majeurs.

Un des exemples de cette fécondité de la théorie de l'inflation comme théorie de la formation des structures est son utilisation dans des simulations numériques comme le *Millennium Run* analysée par S. Ruphy⁴⁶. Cette simulation représente l'évolution de la répartition de dix milliards de particules et de vingt millions de galaxies dans un cube dont l'arête de deux milliards d'années-lumière. Elle se fonde sur de nombreux modèles théoriques dont l'un est la théorie de l'inflation, qui est essentielle pour rendre compte de la distribution de la matière noire dans l'Univers jeune. Certes, comme le fait remarquer S. Ruphy, l'équipe VIRGO à l'origine de cette simulation aurait pu choisir une théorie alternative (et cela suffit à montrer que de telles simulations sont plus des prédictions que des expérimentations). Mais le choix de la théorie de l'inflation montre que celle-ci devenue suffisamment féconde pour être connectée à d'autres théories, aux données d'observation et prendre une place centrale dans les recherches sur l'origine des structures : ce n'est plus une hypothèse visant seulement à résoudre certains problèmes du modèle standard de la cosmologie pour le sauver de la réfutation⁴⁷.

5.4 Conclusion du chapitre : le rôle des prédictions dans l'acceptation de la théorie de l'inflation

5.4.1 Une révolution achevée ?

Malgré les succès prédictifs de la théorie de l'inflation, il est difficile de savoir si elle est considérée aujourd'hui comme une théorie valide par l'ensemble de la communauté scientifique. On ne dispose malheureusement

⁴⁶RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 184-195.

⁴⁷Voir l'annexe au chapitre 5 pour plus de détails sur les relations entre inflation et origine des structures.

pas de statistiques pour savoir combien de chercheuses, parmi les cosmologistes, physiciens et astrophysiciens, adhèrent à cette théorie suite aux tests de ses prédictions par les missions COBE, BOOMERANG, WMAP et Planck. Comme on l'a vu, certains scientifiques comme P. Steinhardt ne considèrent toujours pas aujourd'hui que ces prédictions soient suffisantes pour accepter la théorie de l'inflation.

Cependant, on peut montrer que c'est bien parce qu'elle a augmenté sa capacité prédictive dans les années 1990 en s'appliquant au problème de l'origine des structures que la théorie de l'inflation a converti *certaines* de ses anciens détracteurs. Le témoignage de G. Ellis va dans ce sens. S'il fut parmi ceux qui critiquèrent la théorie de l'inflation dans les années 1980, il reconnaît aujourd'hui que l'utilité de la théorie de l'inflation a été démontrée lorsque cette théorie a été appliquée à la question de la formation des grandes structures de l'Univers⁴⁸. Dans un récent état de la recherche des problèmes philosophiques et scientifiques de la cosmologie moderne, G. Ellis maintient l'idée que les problèmes d'horizon et de courbure nulle sont « de nature plus philosophique que physique, car il n'y a aucune contradiction avec des expériences »⁴⁹, mais il remarque aussitôt que :

Accepter [la théorie de l'inflation] a un bonus majeur : l'hypothèse selon laquelle de petites fluctuations quantiques ont été étendues à une si grande échelle par l'inflation qu'elles ont pu fournir les graines pour enclencher la croissance par attraction gravitationnelle des larges structures comme les amas galactiques. Cette théorie fait des prédictions claires et observables concernant le spectre des anisotropies du fond diffus cosmologique, qui ont depuis été vérifiées de manière spectaculaire par les observations de ballons et satellites comme WMAP. L'inflation nous a donc fourni la première théorie

⁴⁸J'ai eu l'occasion de lui poser directement la question pour m'assurer que c'étaient bien les prédictions d'invariance d'échelle et d'équilibre thermique des anisotropies du fond diffus cosmologique qui l'ont convaincu.

⁴⁹George ELLIS, "Issues in the philosophy of cosmology", *Philosophy of Physics*, sous la dir. de Jeremy BUTTERFIELD et John EARMAN, Handbook of the Philosophy of Science Series, Elsevier, 2007, p. 1183–1296, p. 1205.

cohérente sur la formation des structures⁵⁰.

La théorie de l'inflation n'est peut-être pas aussi bien établie que celle du big bang : la détection des ondes gravitationnelles prédites par A. Starobinsky dès 1980 serait la preuve décisive que le spectre de corps noir du fond diffus cosmologique a été pour la théorie du big bang⁵¹. Mais ce que montre le cas de G. Ellis c'est que, comme pour la théorie du big bang, une partie des scientifiques n'ont pas attendu cette preuve décisive pour être convaincus par le scénario de l'inflation.

Ainsi, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, ce n'est pas une prédiction ou deux prédictions isolées qui sont à l'origine de l'acceptation ou du rejet d'une nouvelle théorie cosmologique, mais un ensemble de succès prédictifs qui semblent suffisamment sérieux pour parier sur le développement de la capacité prédictive de cette théorie. L'adhésion à la théorie de l'inflation n'est peut-être pas aujourd'hui complète et sans réserve, mais si cette théorie fait un jour consensus, les prédictions sur l'origine des structures qu'elle a permises auront probablement joué un grand rôle dans cette révolution.

5.4.2 Fécondité *versus* réfutabilité

En devenant une théorie de la formation des structures, la théorie de l'inflation a permis de réaliser des prédictions fécondes qui ont prouvé sa capacité prédictive. Mais peut-elle répondre aux accusations portées par A. Linde et P. Steinhardt dans les années 1990-2000, c'est-à-dire d'être irréfutable ? Il semblerait que non, parce que les modèles d'inflation ont tellement proliféré que même les prédictions des anisotropies du fond diffus cosmologique n'étaient pas suffisante pour réfuter cette théorie.

Cela veut-il dire que le critère de réfutabilité n'a pas eu d'importance dans le développement de la théorie de l'inflation et que les cosmologistes

⁵⁰ELLIS, "Issues in the philosophy of cosmology", p. 1209.

⁵¹En mars 2014, les membres de la mission BICEPS ont affirmé avoir détecté ces ondes gravitationnelles, considérant celles-ci comme le « test définitif » de l'inflation. Ces mesures se sont révélées trop faibles pour écarter la possibilité que leur origine soit attribuable à d'autres sources que des ondes gravitationnelles, mais cette découverte manquée montre l'importance qu'a la prédiction des ondes gravitationnelles pour l'acceptation de la théorie de l'inflation.

n'y accordent plus autant de poids que pendant la controverse entre la théorie de l'état stationnaire et du big bang ?

A. Liddle et D. Lyth, dans la citation rapportée dans la section précédente, admettent que les problèmes de l'horizon et de la courbure ne peuvent pas être « utilisés pour réfuter l'inflation »⁵². Mais leur ligne de défense semble pourtant s'inspirer de la philosophie de Popper lorsqu'ils affirment que les données de COBE étaient les « premières observations que l'on pouvait, plus ou moins directement, interpréter comme des contraintes sur la physique de l'Univers jeune »⁵³. Il n'est donc pas sûr que la philosophie de Popper ait cessé d'avoir de l'influence parmi les cosmologistes actuels.

Cependant, pour l'historien des sciences C. Smeenk, un des rares chercheurs spécialisé dans l'histoire de la théorie de l'inflation, si cette théorie a bien été acceptée en devenant une théorie de la formation des structures, cela ne tient pas à sa capacité à faire des prédictions pouvant la réfuter :

La question à poser au sujet de la théorie de l'inflation, n'est pas de savoir si elle permet de faire différentes prédictions « réfutables », mais en quelle mesure les données observables nous permettent d'inférer les détails de l'inflation ? Si l'on suppose que l'inflation est correcte, qu'est-ce que les données nous permettent d'inférer à propos du champ d'inflation et de son potentiel $V(\phi)$? En ces termes, il est vrai que la théorie de l'inflation comme théorie de la formation des structures propose un ensemble plus riche de contraintes sur la théorie⁵⁴.

Le succès empirique rencontré par la théorie de l'inflation ne devrait donc pas être décrit en termes de succès prédictif, mais de « capacité à déterminer des valeurs cohérentes de paramètres théoriques à partir d'ensembles de données variés et indépendants »⁵⁵.

⁵²LIDDLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, p. 5.

⁵³LIDDLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, p. 1.

⁵⁴Chris SMEENK, "Inflation as a Theory of Structure Formation", *Beyond Einstein*, sous la dir. de D. ROWE, Boston, Birhauser, 2012, p. 27.

⁵⁵SMEENK, "Inflation as a Theory of Structure Formation", p. 25.

C. Smeenk a raison d'insister sur le fait que le succès de la théorie de l'inflation comme théorie de la formation des structures ne tenait pas au fait que les prédictions réalisées par celle-ci étaient réfutables, puisque, comme le soulignait A. Linde il existera toujours un modèle d'inflation possible qui pourra s'accommoder de n'importe quel ensemble de données tant que le mécanisme de l'inflation sera inconnu. En ajustant suffisamment les paramètres du champ scalaire ϕ il est même possible d'obtenir une inflation qui ne mène pas à des fluctuations invariantes d'échelles. Cependant, C. Smeenk jette le bébé avec l'eau du bain lorsqu'il déduit de ce fait qu'*aucune* forme de prédiction n'a joué un rôle dans l'acceptation de la théorie de l'inflation.

En effet, comment les cosmologistes peuvent-ils s'assurer que la théorie de l'inflation a bien cette « capacité à déterminer des valeurs cohérentes de paramètres théoriques à partir d'ensembles de données variés et indépendants » que mentionne C. Smeenk ? La seule méthode dont elles disposent est de prédire, à partir de la valeur de ces paramètres théoriques, des grandeurs observables qui font partie de ces « ensembles de données variés et indépendants ». Pour que les données puissent contraindre les paramètres d'une théorie, il faut que ces données puissent être fixés à partir de cette théorie sans recourir à leur mesure. Autrement dit, elles doivent pouvoir être prédites.

D'autre part, cette « capacité à déterminer la valeur de paramètres théoriques » que C. Smeenk considère comme étant un authentique succès empirique, ne diffère pas de la notion de capacité prédictive développée dans cette thèse : si une théorie a la capacité de fixer théoriquement les valeurs de certains paramètres, c'est qu'elle a la capacité de les prédire.

Les vues développées dans ce chapitre sur la théorie de l'inflation ne semblent donc pas incompatibles avec la conception que C. Smeenk se fait du succès de la théorie de l'inflation : c'est bien le développement de la capacité prédictive globale d'une théorie qui représente un succès empirique et non une ou deux prédictions isolées. Mais cette capacité prédictive n'est pas une propriété patente et manifeste des théories scientifiques : comme on le montre dans la troisième partie (chapitre 7, section 7.3), il est difficile d'évaluer la capacité prédictive d'une théorie,

d'une hypothèse ou d'un modèle. Certaines prédictions, comme les prédictions *robustes* sur l'aspect et la taille des anisotropies du fond diffus cosmologique réalisées par la théorie de l'inflation, sont donc nécessaires pour qu'une théorie révèle sa capacité prédictive. Et de telles prédictions entraînent l'adhésion des scientifiques si elles sont suffisamment fécondes pour qu'elles puissent espérer que la capacité prédictive de la théorie continuera de croître et permettra de d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherches.

Avant de conclure la deuxième partie en résumant les principales caractéristiques de ces prédictions qui ont représenté des succès suffisamment impressionnants pour influencer l'évolution de la science cosmologique, on peut remarquer qu'il n'est donc pas nécessaire qu'une théorie soit réfutable par ses prédictions pour que celles-ci jouent un rôle dans son acceptation. Si la philosophie de Popper avait pu pousser Bondi, Gold et Hoyle à développer la capacité prédictive de la théorie de l'état stationnaire pendant les années 1950, il ne faut pas en conclure pour autant que les prédictions qui jouent un rôle important dans l'évolution des sciences ne sont que les prédictions permettant des réfutations. L'histoire de la cosmologie montre plutôt que les prédictions telles que les conçoit Popper existent, mais qu'il faut souvent attendre plusieurs décennies *après* l'établissement d'une théorie pour qu'une prédiction réellement capable de la réfuter soit testée. La communauté scientifique porte un grand intérêt à ces tests, mais ce ne sont pas ces succès prédictifs qui déclenchent l'adhésion de la plupart de ses membres à une théorie. La philosophie de Popper, dans sa danse avec l'histoire des sciences, semble avoir un temps de retard.

Mais si Popper se trompe en ne mettant l'accent sur les prédictions qui sont des tentatives de réfutation, on se tromperait aussi en croyant que *seules* ces prédictions ont un rôle à jouer dans l'évolution d'une discipline scientifique. Les historiens S. Brush et C. Smeenk font tous les deux la même confusion : ils considèrent que si l'on ne trouve pas de trace de tentatives de réfutation dans l'histoire de la cosmologie, cela signifie que les prédictions n'y ont joué aucun rôle. Ils prêtent alors le flanc à la critique formulée par Popper lui-même, selon laquelle la théorie du big

bang ne serait « pas de la science » selon sa conception, puisque toutes les tentatives de critiques et de remise en cause de cette théorie seraient écartées par l'usage d'hypothèses auxiliaires *ad hoc*.

Il existe pourtant de nombreuses prédictions qui sont considérées par les scientifiques comme des confirmations même si elles ne sont pas des réfutations. On attribue parfois cela à une croyance naturelle et naïve en l'induction que partageraient tous les scientifiques — comme si la pratique de la science ne les avait pas mis en garde contre les problèmes de l'induction que l'on rencontre dans toute recherche appliquée. Ce qui ressort de l'étude du rôle des prédictions dans l'évolution de la cosmologie physique, notamment dans les dernières décennies, c'est plutôt que si certaines prédictions s'avèrent suffisamment simples, fécondes ou robustes, alors elles sont envisagées comme des succès laissant espérer de nouvelles perspectives de recherche, de nouvelles prédictions et de nouvelles découvertes. Ce sont ces prédictions fécondes, qu'elles aient été ou non capable de réfuter la théorie dont elles sont dérivées, qui ont été importantes dans l'évolution théorique de la cosmologie.

Conclusion de la deuxième partie : fécondité et capacité prédictive

Dans cette seconde partie, nous avons abordé les questions suivantes :

- Les succès prédictifs ont-ils influencé la reconnaissance de la cosmologie comme une science « mature » ? Si oui, de quel type de succès prédictif s'agit-il ?
- Comment les prédictions, et quels types de prédictions, sont intervenues dans les révolutions scientifiques qu'a connues la cosmologie une fois considérée comme une science mature ?

La première chose que nous avons remarqué est que les succès prédictifs ne sont pas les seuls succès scientifiques à avoir joué un rôle dans la formation et le développement de la cosmologie. Nous avons vu d'autres types de succès :

- Les « considérations cosmologiques » d'Einstein publiées en 1917 (voir section 3.1) ou l'hypothèse de l'inflation d'A. Guth paru en 1981 (voir section 5.2) ont rencontré du succès parce qu'elles prouvaient la *cohérence logique* d'une théorie, c'est-à-dire la non contradiction entre les hypothèses de cette théorie ou entre ces hypothèses et d'autres principes théoriques.
- Certaines découvertes comme celles des quasars par Maarten Schmidt en 1963 (voir section 4.3) ou de la nucléosynthèse stellaire (voir section 4.3) ont joué un rôle important dans le rejet ou l'acceptation de la théories de l'état stationnaire alors même qu'elles ne sont pas prédites par ces théories. Dans ce cas, le succès ou l'échec scientifique d'une théorie consiste à être compatible ou incompatible avec une découverte même si celle-ci n'est ni prédite ni expliquée par cette théorie.
- Enfin, lorsque la théorie de la nucléosynthèse primordiale (voir section 4.1) ou de la nouvelle inflation (voir section 5.2) ont été formulées, nous avons vu que leur premier succès était de rendre compte

de certains phénomènes en faisant l'hypothèse d'un mécanisme physique qui ne permettait pas pour autant de prédire ce phénomène. Il s'agit là d'un succès *explicatif* sans être prédictif.

On peut donc rejeter la thèse selon laquelle *seules* les prédictions ayant été confirmées par l'expérimentation et l'observation représentent un succès, ou que ce type de succès est *nécessaire* pour qu'une nouvelle théorie soit acceptée⁵⁶. Cette réponse est d'autant plus difficile à soutenir que, comme nous l'avons vu par exemple pour la prédiction d'Alpher et Herman concernant la température du ciel (section 4.1) ou celle d'A. Starobinsky concernant les ondes gravitationnelles issues de l'inflation (section 5.2), certaines prédictions peuvent tomber dans l'oubli ou paraître échouer en fonction des données et des moyens d'observations disponibles à l'époque de leur formulation.

Mais on peut aussi rejeter une autre réponse possible à la question du rôle des prédictions qui consisterait à affirmer que les succès prédictifs n'ont joué *aucun* rôle, ou un rôle *mineur*, dans l'évolution de la cosmologie. Nous avons vu que certaines prédictions réussies ont été des facteurs décisifs dans l'adhésion des cosmologistes à trois des révolutions majeures de l'histoire de la cosmologie : l'acceptation des modèles d'Univers dynamiques (voir section 3.2), de la théorie du big bang (voir section 4.3) et de la théorie de l'inflation comme origine des grandes structures de l'Univers (voir section 5.4).

Si l'on se penche maintenant sur la question de savoir si les prédictions réussies sont un bon critère pour reconnaître une science mature comme le soutient J. Worrall (voir section 3.3), l'étude de l'histoire de la cosmologie montre qu'une prédiction isolée comme celle de la récession des galaxies (voir section 3.2), si impressionnante soit-elle, n'a pas été suffisante pour convaincre l'ensemble de la communauté scientifique de la maturité de la cosmologie. De la même manière, lorsqu'on examine en détail la révolution ayant abouti à l'établissement de la théorie du big bang, on se rend compte que ce n'est pas la prédiction du fond diffus cosmologique seule qui a compté dans la conversion de la plupart des

⁵⁶C'est la thèse dite du *prédictivisme inconditionnel*, qui est examinée dans la partie suivante de cette thèse.

cosmologistes à cette théorie (voir section 4.3). Ainsi, la notion de « maturité » semble difficile à utiliser pour rendre compte de la formation d'une discipline et de son intégration progressive aux autres disciplines déjà constituées et institutionnalisées.

Autrement dit, pour rendre compte de la manière dont les prédictions ont influencé l'évolution de la cosmologie, il ne faut pas se concentrer sur quelques épisodes prédictifs isolés, mais sur l'ensemble des prédictions réalisables par une théorie à l'époque où elle a été acceptée par la communauté des cosmologistes. C'est la *capacité prédictive* plus que les prédictions elles-mêmes qui jouèrent un rôle dans l'évolution de la cosmologie (voir sections 4.1 et 4.4).

Mais même si c'est la capacité prédictive globale d'une théorie que les scientifiques considèrent lorsqu'ils acceptent une théorie, ils ne peuvent juger de celle-ci que sur la base des prédictions qui ont concrètement été déjà réalisées par cette théorie (voir section 5.4). Ces prédictions qui permettent de juger de la capacité prédictive d'une théorie et de faire le pari que cette capacité ira croissante et permettra de nouvelles prédictions, de nouvelles découvertes et de nouveaux programmes de recherche dans le futur, est ce que l'on a appelé des *prédictions fécondes*, parce qu'elles ne font pas que prédire un phénomène mais ouvrent aussi de nouvelles perspectives de recherches. Ce sont elles qui ont joué un rôle moteur dans l'acceptation ou le rejet de nouvelles théories cosmologiques (voir sections 3.3, 4.3 et 5.3).

Or, toutes les prédictions ne sont pas à même de prouver la capacité prédictive d'une théorie : certaines semblent ne pas être suffisantes pour cela, comme par exemple la prédiction que la courbure de l'Univers est nulle par les premiers modèles d'inflation (voir section 5.2). L'étude de l'histoire de la cosmologie permet de relever un certain nombre de caractéristiques des prédictions fécondes :

- Comme on l'a vu avec la prédiction de la relation de Slipher-Hubble à la fois par l'effet de Sitter et par le modèle de Lemaître, il existe certains cas de *sous-détermination prédictive* (voir section 3.2) où un même phénomène peut être prédit de deux manières différentes par une même théorie. Dans ce cas, c'est le raisonnement prédictif le

plus *simple*, c'est-à-dire celui qui demande de fixer le moins de paramètres libres dans la théorie de base pour prédire le phénomène, qui a été préféré. Autrement dit, le modèle d'Univers dynamique de Lemaître semblait avoir plus de capacité prédictive que le modèle d'Univers statique de de Sitter non parce qu'il était plus simple *en soi*, mais parce qu'il menait plus aisément à prédire un phénomène étonnant : la récession des galaxies en fonction de leur distance (relation de Slipher-Hubble).

- La prédiction de l'effet de Sitter (section 3.1), de la nucléosynthèse de l'hélium dans l'Univers primordial (section 4.2) ou des anisotropies du fond diffus cosmologique (section 5.3) montrent aussi que les prédictions réussies ne correspondent pas à un seul et unique des trois types de prédiction identifiés à la fin de la première partie (prédictions guidées des lois, par des modèles ou par des données). En cosmologie, les prédictions qui peuvent avoir du succès sont des prédictions de grandeurs observables qui peuvent être fixées indépendamment par la théorie et la mesure. Le statut particulier de la science cosmologique — qui fait le lien entre des théories physiques fondamentales comme la relativité générale ou la physique des particules et des disciplines appliquées comme l'astrophysique ou l'astronomie — montre qu'un succès prédictif demande de parcourir toute la route qui va de la théorie aux données et que cela suppose d'articuler des prédictions guidées par des lois physiques à des prédictions guidées par des modèles d'Univers et des prédictions guidées par des données astronomiques. Une prédiction réussie est donc souvent *pluraliste* : elle utilise les éléments d'autres sciences, et son résultat intéresse les autres sciences.
- Enfin, comme on l'a vu avec la prédiction de la récession des galaxies par différents modèles d'Univers dynamique (voir section 3.2), avec la prédiction du fond diffus cosmologique par différents modèles d'Univers en évolution (voir section 4.2) et avec la prédiction des anisotropies du fond diffus cosmologique par différents modèles d'Univers en inflation (voir section 5.3), les prédictions qui

ont permis aux scientifiques de juger de la capacité prédictive d'une théorie sont des prédictions *robustes*. Elles n'étaient pas faites par *un* modèle isolé de la théorie, c'est-à-dire par un seul ensemble de valeurs de ses paramètres libres, mais par la quasi-totalité des modèles de la théorie, c'est-à-dire qu'elle découle de la théorie quel que soit la manière dont on fixe la valeur de ses paramètres libres (voir section 5.3).

Ce sont donc ces trois types de prédictions qui ont joué un rôle important dans l'histoire de la cosmologie, en convaincant les scientifiques de la capacité prédictive des théories, modèles et hypothèses qui avaient permis de les dériver : les prédictions *simples*, les prédictions *pluralistes* et les prédictions *robustes*. Comme on l'a vu dans la section 5.4, il n'est en revanche pas nécessaire qu'une prédiction puisse *réfuter* sans appel une théorie pour qu'elle soit féconde et influence les cosmologistes.

Mais ce n'est pas parce qu'un succès prédictif influence *de fait* les scientifiques dans leurs choix d'hypothèses qu'il a *en droit* la capacité de prouver cette hypothèse. Dans la partie suivante de cette thèse, on se demande s'il est possible de montrer que les prédictions fécondes ont un rôle spécifique dans la confirmation ou la réfutation des hypothèses, en examinant la valeur de preuve spécifique que peuvent avoir les succès prédictif dans le choix des hypothèses.

Troisième partie

Le rôle des prédictions dans le choix des hypothèses

Introduction de la troisième partie

Cette partie examine la question suivante : est-ce que les prédictions jouent un rôle spécifique et crucial dans le choix des hypothèses scientifiques¹ ? Autrement dit, dans quelle mesure le fait qu'une hypothèse (ou un ensemble d'hypothèses formant une théorie ou un modèle scientifique) permette de réaliser une prédiction réussie contribue-t-il à la sélection de cette hypothèse ? Est-ce qu'une hypothèse menant à des prédictions réussies est plus fiable que si l'on se contente de comparer cette hypothèse à des données déjà connues ou utilisées dans la formulation de cette hypothèse ?

Mendeleïev (1834-1907) par exemple, obtint la médaille Davy décernée par la *Royal Society* en 1882 pour ses travaux sur la classification périodique des éléments chimiques. Cette récompense lui fut décernée après la découverte du Gallium en 1875 et du Scandium en 1879, deux nouveaux éléments chimiques dont Mendeleïev avait prédit en 1871 l'existence et les propriétés. La question posée dans cette partie est de savoir si le succès remporté par la classification périodique de Mendeleïev est dû exclusivement ou en grande partie à ces prédictions réussies ou si elle aurait remporté un succès équivalent même si elle n'avait pas mené à ces découvertes.

Une précision s'impose avant d'aller plus loin. Cette question « est-ce que les prédictions jouent un rôle spécifique et crucial dans le choix des hypothèses scientifiques ? » n'est pas à entendre, dans cette partie, comme une question *de fait* mais *de droit*. Le problème n'est plus ici, comme dans la partie précédente, de savoir si les communautés scientifiques ont un comportement consistant à accorder plus de crédibilité aux hypothèses ayant mené à des prédictions réussies, mais de savoir si ce comportement est fondé.

Pour reprendre l'exemple de la classification de Mendeleïev, la question n'est pas de savoir si le jury lui ayant attribué la médaille Davy a été

¹J'utilise l'expression « choix des hypothèses » pour désigner à la fois les théories de la *confirmation* qui cherchent à évaluer comment certaines données peuvent prouver une hypothèse, et les théories de la *réfutation* ou de la *corroboration* qui estiment qu'une telle confirmation est impossible mais que les données empiriques peuvent tout de même servir à faire le tri entre hypothèses rivales.

ou non plus impressionné par les prédictions du Gallium et du Scandium que par la classification des soixante éléments déjà connus, mais de savoir s'ils avaient *raison* de considérer que ces prédictions rendaient la classification de Mendeleïev plus crédible que si elle n'avait eu aucun succès prédictif à son actif. Cette question est cruciale pour évaluer la portée des succès prédictifs, ce qui est l'objectif principal de cette thèse : nous avons vu dans la partie précédente que certains succès prédictifs influençaient les communautés scientifiques, il s'agit à présent de savoir si cette influence n'est pas irrationnelle et si les succès prédictifs peuvent effectivement avoir valeur de preuve dans la confirmation ou la corroboration des hypothèses.

Normer ainsi les comportements des communautés scientifiques demande d'examiner la relation logique qui existe entre une preuve empirique et une hypothèse que l'on cherche à confirmer. Étant donné qu'il s'agit d'estimer la fiabilité d'une hypothèse sur la base de certaines preuves, on doit employer à cette fin non seulement une logique *déductive*, entendue comme système de règles des inférences certaines, mais aussi une logique *inductive*, conçue depuis Carnap comme « un système de justification qui étend la logique déductive aux inférences incertaines »².

Une *théorie de la confirmation* a pour tâche de formuler à l'aide de ces logiques un ensemble de règles permettant de savoir dans quel cas l'on est autorisé à considérer qu'une preuve confirme une hypothèse, c'est-à-dire la rend plus plausible ou suffisamment plausible pour être acceptable. L'édification d'une théorie de la confirmation est donc un problème à envisager d'un point de vue logique, mais on montre dans cette partie que certaines questions de fait ne sont pas étrangères au problème. En effet, connaître les raisons qui ont poussé les membres de la *Royal Society* à décerner la médaille Davy à Mendeleïev ou les tests statistiques qu'utilisent actuellement les scientifiques pour accepter ou rejeter une hypothèse est déterminant pour savoir si les règles établies par une théorie de la confirmation sont raisonnables ou absurdes³. Puisqu'il s'agit,

²James HAWTHORNE, "Inductive Logic", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward ZALTA, Hiver 2014, 2014.

³La question de savoir si l'on ne fait pas une pétition de principe en voulant normer la pratique des communautés scientifiques à partir d'une théorie de la confirmation

dans cette partie, de savoir si les prédictions jouent un rôle spécifique et crucial dans le choix des hypothèses, on propose ci-dessous de confronter à plusieurs reprises nos résultats à certains des cas paradigmatiques de confirmation d'hypothèses ou de théories tirés de l'histoire des sciences et de l'activité scientifique contemporaine.

Parmi les différentes conceptions du choix des hypothèses, on peut identifier en première approximation trois positions possibles concernant le rôle des prédictions. La thèse selon laquelle une hypothèse qui n'a pas connu de succès prédictif ne peut être ni confirmée ni corroborée est ce que j'appelle le *prédictivisme inconditionnel*. La thèse selon laquelle une prédiction réussie n'est pas toujours nécessaire à la confirmation d'une hypothèse mais a *parfois*, sous certaines conditions, plus de poids qu'une simple comparaison avec des preuves empiriques déjà connues ou déjà utilisées est appelée le *prédictivisme conditionnel*⁴. Enfin, la thèse selon laquelle les prédictions, quelles que soient les conditions, n'ont aucun rôle spécifique à jouer et ne devraient pas peser plus dans notre choix des hypothèses que la comparaison avec des données déjà connues ou déjà utilisées, peut être appelée l'*antiprédictivisme*.

Cette troisième partie a pour objectif d'examiner ces différentes thèses. Cependant, rappelons qu'il n'existe pas une seule forme de raisonnements prédictifs, mais plusieurs (voir chapitre 1, conclusion). La question qui est traitée ici n'est donc pas seulement de savoir quel rôle jouent les prédictions dans le choix des hypothèses, mais aussi de savoir *quelles* prédictions (si tant est qu'il y en ait) jouent un rôle crucial et spécifique dans le tri des hypothèses scientifiques et quel est ce rôle.

On se demandera en particulier si les prédictions dont nous avons observé le rôle moteur dans l'histoire de la cosmologie physique justifient l'acceptation des hypothèses dont elles peuvent être tirées. Dans la partie précédente de cette thèse, nous avons vu que certaines prédictions étaient *fécondes*, c'est-à-dire qu'elles apparaissaient comme un succès suffisant

elle-même fondée sur cette pratique est discutée dans la section 6.2.2.

⁴Cette distinction entre prédictivisme inconditionnel et prédictivisme conditionnel recoupe en partie celle entre prédictivisme global et prédictivisme local développée par Christopher Hitchcock et Elliott Sober. Voir Christopher HITCHCOCK et Elliott SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", *The British Journal for the Philosophy of Science* 55.1 (2004), p. 1–34, p. 3.

aux yeux des scientifiques pour qu'ils parient que la capacité prédictive des hypothèses au fondement de ces prédictions irait en grandissant et non en s'amenuisant. Dans cette partie, il s'agira d'examiner si ce pari n'est qu'un acte de foi motivé par des sentiments et de vives impressions psychologiques ou si l'on peut en rendre compte rationnellement.

Afin de voir quelles prédictions jouent un rôle spécifique dans le choix des hypothèses scientifiques et comment elles jouent ce rôle, nous commencerons par étudier la controverse sur le prédictivisme, en remontant de ses origines au XIX^e siècle et suivrons ses développements jusqu'à nos jours. Retracer l'histoire de ce débat permet d'exposer en détail les différentes positions possibles dans le débat sur le prédictivisme et de montrer les objections auxquelles doit répondre toute thèse prédictiviste ou antiprédictiviste; c'est à cette tâche qu'est consacré le chapitre 6, le premier de cette partie.

Dans le chapitre 7, je soutiens qu'une thèse prédictiviste fondée sur le développement de la capacité prédictive des hypothèses est cohérente avec les réquisits d'une théorie de la confirmation et la pratique des communautés scientifiques.

Chapitre 6

Le débat sur le prédictivisme

Ce chapitre présente dans un ordre chronologique les débats philosophiques sur le rôle des prédictions dans le choix et la confirmation des hypothèses. Faire une histoire du débat du prédictivisme a plusieurs intérêts — outre le fait qu’il n’existe, à ma connaissance, aucun exposé historique en langue française sur ce sujet :

- De nombreux auteurs contemporains traitant de ces questions font référence aux débats passés, notamment celui qui opposa William Whewell (1794-1866) et John Stuart Mill (1806-1873) entre 1843 (date de la première publication du *Système de Logique* de Mill) et 1866 (date de la mort de Whewell) et s’inscrivent implicitement ou explicitement dans la continuité d’un de ces deux philosophes¹.
- Un exposé historique permet de montrer comment chaque position prédictiviste ou antiprédictiviste s’est raffinée pour répondre aux objections de ses opposants et ainsi de voir plus clairement quelles positions philosophiques sont disponibles dans ce débat.

¹Voir notamment John Maynard KEYNES, *A Treatise on Probability*, London, McMillan et co, 1921, chapitre 23, Colin HOWSON, “Accommodation, prediction and Bayesian confirmation theory”, *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1988, p. 381–392, Gerd BUCHDAHL, “Inductivist Versus Deductivist Approaches in the Philosophy of Science as Illustrated by Some Controversies Between Whewell and Mill”, *The Monist* 55.3 (1971), p. 343–367 ; HITCHCOCK et SOBER, “Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting” ; Malcolm FORSTER, “The Debate between Whewell and Mill on the nature of scientific induction”, *Handbook of the History of Logic*, sous la dir. de Dov GABBAY, John WOODS et Akihiro KANAMORI, Elsevier, 2004, p. 10–93.

- Enfin, cet historique permet d'exposer les thèses de certains auteurs suffisamment en détail pour leur être fidèle et ne pas se contenter de reconduire les idées reçues à leur sujet.

La première section de ce chapitre examine la naissance du débat sur le prédictivisme au XIX^e siècle, notamment dans le cadre de la controverse entre Mill et Whewell. Les deuxième et troisième sections traitent de la place des prédictions dans deux traditions qui se développèrent au XX^e siècle dans la continuité du débat Whewell-Mill. Enfin, la quatrième section expose le problème des preuves déjà connues (*old evidence*) qui est au fondement du débat actuel sur le prédictivisme.

6.1 La naissance du débat sur le prédictivisme au XIX^e siècle

Il est difficile d'identifier l'origine de la thèse selon laquelle l'objectif des scientifiques — notamment des astronomes — est de réaliser les prédictions les plus précises possibles. Andreas Osiander (1498-1552) par exemple, l'éditeur de *La Révolution des orbés célestes* (1543) de Copernic, affirmait déjà dans la préface à l'ouvrage :

C'est le propre de l'astronome [...] d'imaginer et d'inventer des hypothèses quelconques, à l'aide desquelles ces mouvements (aussi bien dans l'avenir que dans le passé) pourraient être exactement calculés conformément aux principes de la géométrie².

On retrouve, trois siècles plus tard, le même objectif attribué par Auguste Comte (1798-1857) à l'*ensemble* de la science :

La perfection spéculative d'une science quelconque doit se mesurer essentiellement par ces deux considérations principales : la coordination plus ou moins complète et la prévision plus ou moins exacte. Ce dernier caractère nous offre surtout

²Nicholas COPERNIC, *Des Révolutions des orbés célestes*, trad. par Alexandre KOYRÉ, Paris, Auguste Blanchard, 1543, p. 28.

le critérium le plus clair et le plus décisif comme se rapportant directement au but final de toute science³.

Cependant, si l'on se concentre sur la question non pas de savoir si prédire est le but ou l'un des buts de toute science mais de savoir si une hypothèse ayant engrangé des succès prédictifs est plus crédible qu'une hypothèse n'ayant pas connu ce type de succès, alors la première controverse développée sur cette question est celle qui opposa Whewell et Mill au cours du XIX^e siècle.

6.1.1 Le débat Whewell-Mill

Whewell était titulaire d'une chaire au « *Trinity College* » de Cambridge — où il avait été auparavant étudiant — lorsqu'il commença à publier en 1837 une *History of inductive sciences*, suivie d'une *Philosophy of inductive sciences* trois ans plus tard. Un grand nombre des thèses qu'il soutient dans ces volumes furent attaquées par Mill dès la première édition de son *Système de logique* en 1843, mais c'est à partir de la troisième édition en 1851 que ces critiques furent développées et systématisées, notamment dans la troisième partie de cet ouvrage intitulée « De l'induction ». Ce débat entre Mill et Whewell se poursuivit au fil des éditions du *Système de logique* (jusqu'à la 7^e édition en 1868) et des traités que Whewell consacra notamment à répondre aux objections de Mill (*Of Induction* en 1849 et *On the philosophy of discovery* en 1860).

Il existe de nombreuses manières de caractériser ce débat entre Mill et Whewell, parce qu'ils abordèrent de nombreux problèmes comme la nature et les règles de l'induction, les rapports entre philosophie et histoire des sciences ou l'existence de connaissances *a priori*⁴. Une partie de

³Auguste COMTE, *Cours de philosophie positive*, vol.2, Paris, Borrani et Droz, 1835, p. 332.

⁴Pour un aperçu plus global du débat Mill-Whewell, voir notamment BUCHDAHL, "Inductivist Versus Deductivist Approaches in the Philosophy of Science as Illustrated by Some Controversies Between Whewell and Mill"; Robert BLANCHÉ, *L'Induction scientifique et les lois naturelles*, Paris, Presses Universitaires de France, 1975, ch.1; John LOSEE, "Whewell and Mill on the Relation Between Philosophy of Science and History of Science", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 14.2 (1983), p. 113–126; Struan JACOBS, "John Stuart Mill on Induction and Hypotheses", *Journal of the History of Philosophy* 29.1 (1991), p. 69–83

ce débat concerne directement la question de savoir quelle place il faut donner aux prédictions dans la vérification des hypothèses obtenues par induction. Si l'on s'en tient aux quelques extraits fréquemment cités de ce débat, on peut avoir la nette impression que les deux philosophes s'opposent frontalement. Whewell semble soutenir un prédictivisme inconditionnel qui fait des prédictions un test indispensable dans la vérification des hypothèses :

Ainsi, les hypothèses que l'on accepte doivent expliquer les phénomènes déjà observés. Mais elles doivent faire plus que cela : nos hypothèses doivent prédire des phénomènes qui n'ont pas encore été observés, au moins des phénomènes du même genre [*kind*] que ceux pour l'explication desquels on a inventé l'hypothèse⁵.

À l'inverse, Mill semble être l'un des premiers philosophes à professer explicitement un *antiprédictivisme* qui n'attribue aucun rôle spécifique aux prédictions dans la vérification des hypothèses :

Cependant, on semble croire qu'une hypothèse de cette nature mérite d'être plus favorablement accueillie lorsque, tout en rendant compte des faits connus, elle a conduit en même temps à l'anticipation et à la prédiction d'autres faits que l'expérience a ensuite vérifiés. [...] Ces prédictions et leur accomplissement sont, assurément, faits pour impressionner les personnes étrangères à ces matières [*uninformed*], dont la foi en la science ne se fonde que sur ces sortes de coïncidences entre les prédictions et les événements [*what comes to pass*]. Mais il est étrange que des hommes de sciences y attachent tant d'importance⁶.

On trouve dans cette citation un des principaux arguments antiprédictivistes : les succès prédictifs ne feraient qu'impressionner l'imagina-

⁵William WHEWELL, *Novum organon renovatum*, Londres, J. W. Parker & son, 1858, II, ch.5, §10, p. 86.

⁶John Stuart MILL, *Système de logique déductive et inductive : exposé des principes de la preuve et des méthodes de recherche scientifique*, trad. par Louis PEISSE, 6^e éd., t. 2, Paris, Librairie Philosophique de Ladrange, 1866, III, ch.14, p. 19.

tion, mais cette influence toute psychologique ne justifierait en aucune mesure de donner aux prédictions un statut privilégié dans le processus de vérification des hypothèses.

Cependant, cette opposition entre Whewell et Mill est moins évidente qu'il n'y paraît à la seule lecture de ces deux citations. Un exposé plus détaillé de leurs arguments permet de montrer sur quels points porte réellement leur désaccord et quels sont les enjeux fondamentaux de la première controverse sur le prédictivisme.

6.1.2 Hypothèses et prédictions dans la philosophie de Whewell

L'exposé le plus complet que donne Whewell de sa conception du rôle des prédictions dans la vérification des hypothèses se trouve dans la deuxième partie de la *Philosophy of inductive sciences*, intitulée *Novum Organum Renovatum* parce que son but est d'étendre la méthode de Bacon aux sciences telles qu'elles se sont développées depuis le XVII^e siècle⁷.

Pour Whewell, l'induction n'est jamais uniquement une « simple juxtaposition de faits »⁸ concluant à une proposition plus générale que ces faits : c'est un « processus mental » au cours duquel l'esprit rajoute une « conception » qui vient de son propre fond et qui « collige » les faits ensemble. La première loi de Kepler par exemple, qui énonce que les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers, n'est pas obtenue par la simple juxtaposition de l'observation de différentes positions d'une planète comme Mars. C'est l'esprit de Kepler qui a lié toutes ces positions de Mars en utilisant une « conception » qui n'était pas contenue dans ces observations : le concept d'ellipse⁹.

Puisque l'induction est avant tout une opération mentale dans laquelle l'esprit intervient, elle consiste toujours, d'après Whewell, en la formulation d'une hypothèse qui doit ensuite être soumise à un test pour être vérifiée. Ce test consiste à vérifier les prédictions que l'on tire de cette

⁷Dans *Of induction* et *On the philosophy of discovery*, Whewell reformule la même conception de l'induction, les mêmes arguments et les mêmes exemples pour répondre aux objections de Mill.

⁸WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §2, p.72.

⁹WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §3, p. 75.

hypothèse : c'est pourquoi Whewell peut être considéré comme un prédictiviste *inconditionnel*. Mais il faut bien noter que Whewell distingue deux types de prédictions, qui ne jouent pas le même rôle dans la vérification de l'hypothèse : les prédictions de « phénomènes du même genre que ceux pour l'explication desquels on a inventé l'hypothèse »¹⁰ et les prédictions « qui nous permettent d'expliquer et déterminer des cas d'un genre *différent* de ceux considérés dans la formation de notre théorie »¹¹.

Whewell donne comme exemples de prédictions du même genre de faits les prédictions des éclipses et des positions des planètes par les théories astronomiques géocentriques ou la prédiction du grossissement d'une lentille par les lois de la réfraction. On voit que ces exemples s'appliquent à ce que l'on a appelé, dans la première partie de cette thèse (section 1.3.1), des *prévisions* c'est-à-dire la prédiction d'occurrences futures ou encore inconnues (le terme anglais utilisé par Whewell est indifféremment *to foretell* ou *to predict* pour désigner les prédictions de faits du même genre).

Il pourrait sembler étonnant d'accorder plus de poids à ces prédictions qu'à l'explication de phénomènes déjà connus ou passés lorsqu'il s'agit de vérifier une hypothèse. En effet, un fait n'est *futur* ou *inconnu* que par rapport à nous, observateurs. Si l'on ne considère que le rapport logique entre une hypothèse *h* et un fait *e*, la question de savoir si *e* est futur ou inconnu *pour nous* ne devrait pas intervenir. Mais pour Whewell, c'est justement parce que le caractère futur ou inconnu d'un fait ne devrait pas rentrer en ligne de compte lorsqu'on imagine et teste des hypothèses que les prédictions réussies sont des tests satisfaisants d'une induction :

En effet notre acception d'une hypothèse implique qu'elle est tenue pour vraie de toutes les instances particulières, c'est-à-dire que le fait que ces cas appartiennent au passé ou au futur ne doit faire aucune différence dans l'application de cette règle. Ainsi, elle prédira les résultats de nouvelles combinaisons [de ces cas] aussi bien qu'elle expliquera l'occurrence d'anciens cas. Et qu'elle prédise ainsi avec certitude et exac-

¹⁰WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §10, p. 86.

¹¹WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §11, p. 88.

titude est l'une des manières de vérifier qu'une hypothèse est correcte et utile¹².

Autrement dit, pour Whewell, c'est parce que les chercheuses forment leurs hypothèses à partir de faits déjà connus et observés qu'elles sont susceptibles de faire des inductions qui ne s'appliquent qu'à ces faits et donc que les prédictions sont un mode de vérification pertinent : elles permettent de s'assurer que la relation entre un fait et une hypothèse n'est pas soumise à ces considérations temporelles extrinsèques. Ainsi la vérification par les prédictions joue le rôle de garde-fou contre un biais cognitif bien connu des psychologues consistant à ne chercher que les preuves qui peuvent s'accorder avec une hypothèse déjà formulée.

La citation de Whewell donnée ci-dessus est aussi intéressante par ce qu'elle ne dit pas : Whewell n'affirme pas que les prédictions de faits du même genre sont garantes de la *vérité* d'une hypothèse, mais uniquement de son exactitude et de son utilité¹³. Ce sont les prédictions de faits d'un autre genre qui ont, pour Whewell, le pouvoir de nous assurer qu'une hypothèse représente bien les relations réelles entre les phénomènes telles qu'elles existent dans la nature.

Parmi les exemples que prend Whewell de ce type de prédictions, on trouve notamment le fait que la théorie de l'attraction universelle de Newton ait permis de prédire les trois lois de Kepler et la précession des équinoxes ou le fait que l'optique ondulatoire de Young et Fresnel, conçue pour expliquer les phénomènes de diffraction et de double réfraction, ait aussi permis de prédire sans ajout d'hypothèses supplémentaires les phénomènes de polarisation lumineuse.

Ces exemples montrent que l'on n'a plus affaire ici à des prédictions caractérisées temporellement, puisque les lois de Kepler étaient connues *avant* que Newton ne formule sa théorie et les phénomènes de polarisation

¹²WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §10, p. 86.

¹³On ne trouve, ni dans la philosophie de Whewell ni dans celle de Mill, de distinction entre la vérification et la confirmation d'une hypothèse telle que l'on peut en trouver dans les théories actuelles de la confirmation (voir Mikaël COZIC, "Confirmation et induction", *Précis de philosophie des sciences*, sous la dir. d'Anouk BARBEROUSSE, Denis BONNAY et Mikaël COZIC, Paris, Vuibert, 2011, p. 62-63.) Cependant, l'idée qu'il existe différents *degrés* de vérification d'une hypothèse est quant à elle présente chez les deux auteurs.

de la lumière *avant* que Young et Fresnel ne donnent naissance à la version moderne de l'optique ondulatoire. Ce qui fait que les explications de ces faits déjà connus puissent aussi être appelées des *prédictions* est que ces faits n'ont pas été *utilisés* dans la conception de ces théories, ou, pour le dire autrement, la théorie de Newton ou celle de Fresnel rendent compte de faits qu'elles n'avaient pas pour objectif initial d'expliquer. Whewell le dit explicitement :

Lorsque l'hypothèse, *d'elle-même et sans aucun ajustement à cette fin*, nous donne la règle et la raison d'une classe de phénomènes *qui n'étaient pas envisagés dans sa construction*, alors nous avons un critère de sa réalité qui n'a jamais été attribué à des hypothèses fausses¹⁴.

On voit dans cette citation que le type de prédiction dont parle Whewell n'est pas caractérisée *temporellement* comme la prévision de phénomènes futurs ou inconnus, mais *heuristiquement* (voir section 1.3.1 et plus loin section 6.4.1) c'est-à-dire comme le fait de rendre compte de phénomènes qui n'ont pas servi à l'élaboration d'une théorie. Ce type de prédiction peut ainsi porter non seulement sur des « instances particulières » mais aussi sur des propositions générales qui sont déjà le résultat d'inductions antérieures, comme les lois de Kepler.

Le terme qu'utilise Whewell pour nommer ce type de prédiction de faits d'un genre différent est la « consilience des inductions » puisqu'il s'agit bien de montrer qu'une nouvelle hypothèse peut rendre compte d'inductions déjà vérifiées. Ce terme est doublement trompeur : il laisse penser que la méthode hypothétique de Whewell est inductive au sens où l'on utiliserait une inférence pour passer de faits particuliers à des faits généraux et il donne le sentiment qu'aucune prédiction n'est impliquée dans ce processus. Mais, comme le remarque L. Laudan¹⁵, des trois sens que l'on peut donner au terme « consilience des inductions » dans l'œuvre de Whewell, les trois impliquent la prédiction de phénomènes

¹⁴WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §11, p. 90. Je souligne.

¹⁵Larry LAUDAN, "William Whewell on the Consilience of Inductions", *The Monist* 55.3 (1971), p. 368–391, p. 371.

soit surprenants, soit d'un genre différent de ceux utilisés pour formuler l'hypothèse.

Whewell attribue aux prédictions de genre différent le rôle d'être un critère de *vérité* des hypothèses, c'est-à-dire d'indiquer qu'une hypothèse décrit bien des entités et des relations existant réellement dans la nature¹⁶. Mais il ne discute pas un problème d'importance pour sa conception : comment savoir si deux faits sont d'un genre différent¹⁷ ? Est-ce parce qu'ils n'ont pas été envisagés par une scientifique dans la formulation de son hypothèse ? Mais en quoi une telle donnée psychologique devrait-elle intervenir dans la relation de confirmation entre une hypothèse et un fait ? Est-ce parce qu'ils appartiennent à des espèces naturelles [*natural kinds*] différentes ? Mais si une hypothèse s'applique aussi bien à deux faits, cela ne veut-il pas dire qu'ils appartiennent à une même espèce naturelle ?

Les arguments de Whewell en faveur du prédictivisme ne sont donc pas sans difficultés. Mais il rajoute, dans les paragraphes 12 et 13 du chapitre 5 de la partie II du *Novum organum renovatum*, une remarque intéressante : si l'on prend un point de vue *diachronique* sur les hypothèses qui ont bénéficié de la consilience des inductions, on se rend compte qu'elles se sont développées sans se complexifier. En effet, si une hypothèse n'a pas recours à d'autres hypothèses *ad hoc* pour étendre son domaine à d'autres faits que ceux qui ont servi à sa formulation, alors elle reste plus simple dans son développement qu'une hypothèse qui ne permet pas la consilience des inductions. Cette remarque de Whewell est d'importance pour soutenir le rôle particulier des prédictions dans le choix des hypothèses : une hypothèse permettant de prédire des phénomènes de genres différents a plus de probabilité d'être formulée simplement et de conserver cette simplicité dans son développement qu'une hypothèse n'ayant pas cette capacité. Ainsi, par exemple, la théorie ondulatoire de la lumière s'applique aux phénomènes de polarisation de la lumière comme à ceux de réfraction et de diffraction en ne changeant

¹⁶On examine ses arguments dans le chapitre 6, section 6.1.1.

¹⁷Ce problème de la philosophie de Whewell a bien été repéré par L. Laudan et la solution qu'il propose est similaire à celle que je soutiens dans le chapitre 7, section 7.3.3. LAUDAN, "William Whewell on the Consilience of Inductions", p. 375.

qu'une seule de ses hypothèses : la lumière est une onde transversale et non longitudinale.

Si l'on résume la position de Whewell sur le rôle des prédictions dans la vérification des hypothèses, on se rend compte d'un fait rarement souligné (probablement parce que Whewell emploie le terme trompeur de « consilience des inductions ») : les prédictions sont pour lui le *seul* test possible des hypothèses scientifiques, mais il existe différents types de prédictions. Les premières ont un rôle pratique : elles servent de garde-fou contre le biais de confirmation. Les secondes permettent d'aller plus loin et de *vérifier* complètement une hypothèse, ce qui signifie qu'elle devient, pour Whewell, un fait aussi réel que n'importe quel fait observé¹⁸. C'est essentiellement sur ce dernier point que se focalisent les critiques de Mill.

6.1.3 Hypothèses et prédictions dans la philosophie de Mill

Pour Mill, à la différence de Whewell, l'induction n'est pas un acte mental par lequel se forme une hypothèse, mais une inférence qui transforme une série de propositions particulières en une proposition générale. La méthode inductive consiste en un ensemble de règles à suivre pour réaliser ces inductions de la manière la plus fiable possible¹⁹ et diffère donc d'après Mill de la méthode déductive et de la méthode hypothétique.

La méthode déductive s'appuie sur l'inférence inductive puisqu'elle consiste elle-même en trois étapes : l'*induction* qui aboutit à l'affirmation d'une loi portant sur le comportement de certaines causes, le *raisonnement* qui détermine la manière dont ces causes se combinent dans une situation donnée et la *vérification* par laquelle on compare le calcul des effets de la cause aux phénomènes observés²⁰. On voit que cette méthode

¹⁸Whewell fait souvent remarquer qu'une théorie vérifiée, comme la théorie de Newton, est un *fait* et non plus une simple conjecture et qu'en tant que tel elle peut servir de base à de futures inductions.

¹⁹Cela ne signifie pas, comme le fait remarquer Buchdhal, que les *processus* inductifs sont infaillibles : uniquement que les règles de l'induction sont valides. BUCHDAHL, "Inductivist Versus Deductivist Approaches in the Philosophy of Science as Illustrated by Some Controversies Between Whewell and Mill", p. 346-347

²⁰MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p. 8.

implique une prédiction — l'étape de raisonnement — par laquelle on vérifie le résultat de l'induction.

Cette remarque suffirait à prouver qu'il n'est pas exact, contrairement à ce qu'on lit souvent, d'affirmer que Mill n'attribue *aucun* rôle aux prédictions dans le contrôle des théories scientifiques. Pour Mill, une induction a besoin d'être vérifiée et elle l'est par la vérification des conséquences de son résultat. Mais c'est surtout dans la troisième méthode décrite par Mill, la méthode hypothétique, que les prédictions jouent un rôle particulier.

La méthode hypothétique, elle, « supprime la première des trois opérations [de la méthode déductive] (l'induction constatant la loi) »²¹. Bien que Mill semble traiter dans certains passages avec dédain la méthode hypothétique — qui ne serait qu'un cas dégénéré de méthode déductive — il affirme pourtant qu'elle est légitime et aboutit à une vérification complète si elle satisfait une condition :

Ce procédé [la méthode hypothétique] peut évidemment être légitime à une condition [...] nous voulons être certains que la loi hypothétiquement établie est vraie; et le fait qu'elle conduise déductivement à des résultats vrais ne garantit cette certitude qu'à la condition qu'une loi fausse ne puisse mener à un résultat vrai, qu'aucune autre loi que la loi supposée ne conduise aux mêmes conclusions²².

Mill n'emploie pas ici le terme de « prédiction » pour désigner les conséquences observables d'une hypothèse, mais l'exemple qu'il prend pour illustrer son argument est celui de la prédiction de la deuxième loi de Kepler à partir de l'hypothèse d'une force centrale dirigée vers le Soleil. Cet exemple est *le même* que celui qui illustre la consilience des inductions dans le *Novum organum renovatum*. Néanmoins, la différence entre Whewell et Mill ne tient pas seulement au fait que l'un nomme

²¹MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p.9. On voit là tout ce qui sépare la conception de l'induction de Mill de celle de Whewell : pour ce dernier toute induction est la proposition d'une hypothèse, alors que pour le premier la méthode inductive consiste précisément à se passer d'hypothèse.

²²MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p. 9-10.

prédiction ce que l'autre se contente d'appeler une « vérification ». Pour Mill, une prédiction ne peut vérifier une hypothèse que si elle satisfait une *condition d'absence d'hypothèse alternative*. Cette condition est parfaitement légitime d'un point de vue logique : puisque l'on peut déduire une conséquence vraie d'un antécédent faux, il est nécessaire de montrer qu'il n'y a qu'un seul antécédent possible d'une conséquence donnée pour que l'on puisse conclure de la vérité de la conséquence à la vérité de l'antécédent.

Autrement dit, Mill envisage la possibilité de plusieurs hypothèses h, h', h'', \dots , incompatibles entre elles et menant à la même prédiction d'un fait e : dans ce cas effectivement, la prédiction ne garantit la vérité d'aucune des hypothèses h, h', h'', \dots . Dans *On the philosophy of discovery*, Whewell répond à Mill que de tels cas n'apparaissent jamais dans l'histoire des sciences. Cette réponse est, comme on le montre dans la partie suivante, peu satisfaisante, puisque plusieurs cas historiques semblent confirmer la possibilité d'hypothèses alternatives menant à une même prédiction. De plus, on voit mal comment on pourrait remettre en question cette objection que Mill fait à Whewell, puisque Whewell ne propose aucun argument logique pour prouver qu'une prédiction réussie surprenante est plus qu'un effet psychologique mais aussi une preuve de la vérité d'une hypothèse.

Mais même si on laisse de côté la réponse de Whewell, on voit bien sur quel point se concentre l'objection de Mill : ce n'est pas que les prédictions tirées d'hypothèses ne servent à rien dans l'évaluation de celles-ci, mais qu'elles ne peuvent servir de critère de vérité comme le soutient Whewell qu'à la condition de satisfaire une condition logique très contraignante. Or cette question de savoir si les prédictions réussies sont un critère de vérité des hypothèses n'est pas la même que celle de savoir si elles rendent ces hypothèses plus fiables et sont utiles dans l'évaluation de plusieurs hypothèses concurrentes. Or, à ce sujet, Mill reconnaît bien que les hypothèses prédictives sont indispensables à la science.

Comme l'a montré Struan Jacobs²³, au fil des rééditions du *Système de logique*, Mill a accordé de plus en plus d'importance au rôle des hypo-

²³JACOBS, "John Stuart Mill on Induction and Hypotheses", p. 80.

thèses, ce qui donne au chapitre 14 de la troisième partie de son ouvrage un aspect paradoxal et désorganisé. D'après S. Jacobs, ces modifications ont été influencées par la lecture du deuxième tome du *Cours de philosophie positive* de Comte, dans lequel celui-ci reconnaît l'intérêt de la méthode hypothétique pour « anticiper l'expérience »²⁴ et ne la condamne que lorsqu'elle consiste à imaginer une cause inobservable à des phénomènes observables.

De même, pour Mill les hypothèses portant sur les causes sont impossibles à prouver, mais les hypothèses portant sur les lois permettent d'*anticiper* les phénomènes expérimentaux²⁵, c'est-à-dire de réaliser des expériences qui sans elles auraient été trop complexes. Ainsi Mill attribue-t-il aux hypothèses l'important rôle de guider les recherches expérimentales et de « transformer les vérités expérimentales en vérités déductives »²⁶ en comparant les résultats attendus aux résultats observés et en modifiant l'hypothèse par une série d'essais et d'erreurs. Ce procédé, consistant à tirer des prédictions d'une hypothèse, peut, d'après Mill, mener « au même résultat qu'une induction ». Pourtant et c'est là toute l'ambiguïté de la position de Mill, il ne va jamais jusqu'à considérer que cette méthode est équivalente « aux conditions de la preuve » et il continue à opposer (dans une note consacrée aux travaux de Darwin) « les règles de l'induction » et « les règles de l'hypothèse »²⁷. Pour Mill, il convient donc bien de séparer la *fécondité pratique* des hypothèses et des prédictions que l'on en tire, qui permet d'aboutir au même résultat qu'un *processus* inductif et leur *rôle logique* dans la confirmation d'une hypothèse, qui ne peut jamais être le même que celui d'une *preuve* inductive.

L'antiprédicativisme de Mill est donc plus fin que la caricature à laquelle il est parfois réduit : il ne consiste pas à n'accorder aucun rôle aux prédictions dans le choix des hypothèses, mais à montrer que c'est seulement lorsqu'aucune hypothèse alternative ne peut conduire à prédire un phénomène que cette prédiction a valeur de preuve logique. Mill définit ainsi un des principaux problèmes de toute position prédicativiste, que

²⁴COMTE, *Cours de philosophie positive*, p. 337.

²⁵MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p. 14.

²⁶MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p.14.

²⁷MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p.17.

j'appellerai donc le *problème de Mill* : si les prédictions ont bien un rôle pratique et heuristique dans la formulation et le test des hypothèses, ce n'est pas pour autant que l'on peut leur accorder le statut de preuve de ces hypothèses quand d'autres hypothèses alternatives existent²⁸.

Si l'on revient sur les positions de Whewell et Mill, on s'aperçoit qu'ils accordent tous deux un rôle pratique et un rôle de vérification des hypothèses aux succès prédictifs, mais Mill restreint ce rôle au cas où il n'existe aucune hypothèse alternative, tandis que pour Whewell le rôle pratique des prédictions suffit à leur accorder le statut de preuve. Le fond du débat entre Whewell et Mill est donc qu'ils approchent chacun la question de la confirmation des hypothèses d'un angle différent :

- Pour Mill, il s'agit de découvrir les règles qui rendent valide une preuve de cette hypothèse à partir des faits.
- Pour Whewell, il s'agit de comprendre comment une hypothèse prend le pas sur d'autres hypothèses qui concernent les mêmes faits.

Il est tentant de voir dans ces deux approches du débat sur le prédictivisme et de la confirmation des hypothèses, deux tendances qui se seraient prolongées au XX^e siècle. C'est ainsi qu'A. Musgrave par exemple, considère qu'il existe deux grandes catégories de théories de la confirmation dont Mill et Whewell seraient les premiers représentants : les théories *logiques* et les théories *historiques* de la confirmation²⁹. Les premières chercheraient à établir les conditions logiques pour dire qu'une preuve confirme une hypothèse — et à quel degré — tandis que les secondes se

²⁸C'est dans ce contexte qu'il faut comprendre la déclaration antiprédictiviste de Mill citée plus haut. Celle-ci porte sur une hypothèse bien précise : celle d'un éther optique, c'est-à-dire un milieu élastique à l'état de repos absolu supposé par les partisans de l'optique ondulatoire qui décrivaient la lumière comme une vibration de ce milieu. Or Mill ne conteste pas que cette hypothèse a été formulée grâce à la méthode hypothétique et des prédictions mais il reconnaît une autre forme de test pour prouver une hypothèse — l'induction — et conteste que les succès prédictifs de l'éther soient équivalents à ce test, précisément parce que ces prédictions ne satisfont pas la condition d'absence d'hypothèse alternative : « Qui sait si une troisième hypothèse [autre que celles de la nature corpusculaire ou ondulatoire de la lumière] qui embrasserait tous les phénomènes, ne laissera pas un jour aussi en arrière la théorie des ondulations que celle-ci a laissée la théorie de Newton et de ses successeurs ? ». (MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p. 21).

²⁹MUSGRAVE, "Logical versus Historical Theories of Confirmation".

focaliseraient sur les raisons qui, dans un contexte donné, ont permis à une hypothèse d'en supplanter d'autres³⁰.

Dans les deux sections qui suivent, j'utilise cette distinction entre deux *styles* de théories de la confirmation pour voir quel traitement elles ont réservé à la question du prédictivisme, mais en gardant à l'esprit et en soulignant à plusieurs reprises ce que cette distinction peut avoir d'arbitraire, puisque l'on trouve des prédictivistes et des antiprédictivistes dans chacune des deux traditions, ainsi que des auteurs à la frontière de ces deux traditions, comme Charles Sanders Peirce (1839–1914) qui, héritant à la fois du projet de logique inductive de Mill et de la méthode hypothétique de Whewell, a proposé l'un des principaux arguments prédictivistes.

6.1.4 L'héritage de Mill et Whewell dans le prédictivisme de Peirce

Pour Peirce, comme pour Mill, l'activité scientifique combine les méthodes déductive, inductive et hypothétique et un des objectifs de la logique moderne est de trouver les règles qui rendent valides les raisonnements inductifs et hypothétiques. Ces trois méthodes sont fondées sur trois formes de raisonnement qui, d'après Peirce, permettent chacun de réaliser l'une des tâches de la science :

On conçoit naturellement la science comme ayant trois tâches à accomplir : (1) la découverte des Lois, qui est accomplie par l'induction, (2) la découverte des Causes, qui est accomplie par l'inférence hypothétique, (3) la prédiction des Effets, qui est accomplie par la déduction³¹.

Apparemment, dans cette répartition des tâches de la science, les prédictions ne jouent aucun rôle dans la découverte ou la confirmation des

³⁰G. Buchdahl et L. Laudan rattachent tous deux explicitement l'école poppérienne à la philosophie de Whewell. Voir BUCHDAHL, "Inductivist Versus Deductivist Approaches in the Philosophy of Science as Illustrated by Some Controversies Between Whewell and Mill" et LAUDAN, "William Whewell on the Consilience of Inductions".

³¹Charles Sanders PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", *Collected papers of Charles Sanders Peirce II*, 1883, §5.

hypothèses : elles ne sont que l'application de la méthode déductive une fois que les lois ont été découvertes.

Mais dans cet écrit intitulé « A theory of probable inference », Peirce propose une version statistique de ces trois types de raisonnements qui l'amène à développer une position prédictiviste plus proche de celle de Whewell que de celle de Mill³².

Peirce commence par donner la version statistique de la déduction :

Règle La proportion r des M sont P .

Cas $S, S', S'', etc.$ sont nombreux et tirés au hasard parmi les M .

Résultat Donc, probablement et approximativement la proportion r des S sont P ³³.

À partir de cette formule de la déduction statistique, Peirce montre comment il est possible de définir une « règle générale de validité » permettant de définir les formes statistiques de l'inférence inductive et hypothétique. En effet, pour Peirce, les inférences inductives et hypothétiques statistiques doivent leur validité au fait d'être une reformulation de la déduction statistique. Cette reformulation consiste en une « inversion apagogique » des prémisses, qui consiste à inverser l'une des prémisses avec la conclusion d'un syllogisme en niant les deux propositions inversées. Cette reformulation est valide en logique classique et c'est elle qui permet par exemple de passer du *modus ponens* au *modus tollens*.

Pour Peirce, pour trouver la formule des inférences hypothétiques statistiques, il faut réaliser une inversion apagogique du syllogisme de la déduction statistique en considérant que les P ne désignent plus des *objets* mais des *caractéristiques* :

Règle M a par exemple les nombreuses caractéristiques P, P', P'' .

Résultat S a une proportion $\{r\}$ des caractéristiques P .

³²Pour une comparaison entre la méthode inductive de Whewell et la méthode hypothétique de Peirce, voir LAUDAN, "William Whewell on the Consilience of Inductions", p. 370.

³³PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §2.

Cas Donc probablement et approximativement, S a une $\{r\}$ -ressemblance avec M ³⁴.

Cette conception que se fait Peirce des inférences déductives et hypothétiques, notamment dans leur version statistique, lui est spécifique et repose sur une reformulation de la syllogistique certes élégante mais loin d'être orthodoxe. Cependant, cette conception permet à Peirce de considérer que l'inférence hypothétique, même si elle est *ampliative* parce qu'elle peut mener à des résultats faux à partir de prémisses vraies, est bien une inférence *valide*, c'est-à-dire disposant de règles permettant de normer leur validité logique.

Or, parmi ces règles, on trouve la suivante qui concerne directement la question des prédictions :

Une hypothèse ne peut être acceptée que si elle a été vérifiée par une prédiction réussie³⁵.

C'est cette recommandation qui fait de Peirce un prédictiviste. Mais c'est surtout le raisonnement qui amène Peirce à cette conclusion qui intéresse le débat sur le prédictivisme. En effet, pour Peirce, il est indispensable de *prédésigner* la ou les caractéristiques P que doivent avoir les objets M avant de tirer au hasard des S dans l'ensemble des M , car sinon « nous pourrions dans tous les cas trouver une obscure caractéristique que toutes les instances partagent »³⁶.

L'exemple que prend Peirce est le suivant : si l'on liste les cinq premiers poètes d'un dictionnaire biographique et leur âge de mort, on peut trouver des caractéristiques communes à ces cinq nombres que ne partagent pas les âges de mort des autres poètes du dictionnaire :

Aagard, mort à 48 ans ;

Abeille, mort à 76 ans ;

Abulola, mort à 84 ans ;

³⁴PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §4. Peirce pose $\{r\} = 1 - \mathbf{r}$, pour considérer que l'inférence hypothétique statistique est l'inversion apagogique de la déduction statistique.

³⁵PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §8.

³⁶PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §8.

Abunomas, mort à 48 ans ;

Accords, mort à 45 ans ;

Ces cinq âges ont les caractéristiques communes :

1. La différence des deux chiffres composant le nombre divisé par trois donne un reste de un.
2. Le premier chiffre mis à la puissance du second divisé par trois donne un reste de un.
3. La somme des facteurs premiers de chaque âge — en considérant un comme un nombre premier — est divisible par trois³⁷.

Ce que montre Peirce par cet exemple c'est qu'il est toujours possible de trouver une hypothèse qui s'ajuste à un ensemble de données D , quel que soit cet ensemble. C'est pour cela que, comme le faisait remarquer Umberto Eco dans *Le Pendule de Foucault*, les numérologues n'ont aucun mal à retrouver les proportions de la pyramide de Khéops à partir des dimensions d'un kiosque à journaux : une fois que ces dimensions sont données, il suffit de trouver la bonne manipulation numérique pour que les unes correspondent aux autres.

Mais ce qui est encore plus intéressant, c'est que Peirce donne une *démonstration* prouvant qu'il est *toujours* possible d'ajuster ainsi une hypothèse de manière à ce qu'elle rende compte d'un ensemble de données déjà connues. Peirce part du résultat de géométrie suivant :

Une courbe peut être tracée qui passe par une série de points sans passer par une autre série de points, quel que soit le nombre de dimensions³⁸.

En effet, si l'on a n points de données répartis sur un graphe à deux dimensions, il suffit par exemple de choisir comme hypothèse un polynôme de degré $n - 1$ et d'ajuster ses n coefficients pour que la courbe de ce polynôme passe par les n points de données.

Ce théorème étant donné, la démonstration de Peirce se poursuit ainsi : si les qualités $P, P', P'', etc.$ des instances M et S peuvent être

³⁷PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §8.

³⁸PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §8.

conçues comme des valeurs de variables continues, alors il est possible de les traiter comme une série de points de données. De même qu'il est toujours possible de trouver un polynôme passant par un ensemble de points, il est toujours possible de trouver une hypothèse qui sélectionne ces valeurs en excluant les autres.

Ainsi, ce que prouve Peirce dans ce passage, c'est que si l'on a un ensemble D de données inclu dans un ensemble plus large D' , il est toujours possible de formuler une hypothèse h telle que h désigne une ou plusieurs propriétés communes à toute donnée e incluse dans D , mais qui ne rend pas compte des autres données e' incluses dans D' . Autrement dit, si l'on formule l'hypothèse h en ayant connaissance de D on risque de formuler une hypothèse qui ne rende compte que de D mais pas de D' . En ne prédésignant pas l'hypothèse h , c'est-à-dire en ne la formulant pas *avant* d'avoir connaissance des données, on risque donc de faire un *ajustement forcé* de cette hypothèse à D qui ne reflète que les caractéristiques idiosyncratiques de ce sous-ensemble de D' et non les caractéristiques communes à toutes les données de D' .

Ainsi, pour Peirce, les prédictions réussies comptent comme une confirmation particulièrement importante dans le test d'une hypothèse, parce qu'elles montrent que cette hypothèse n'a pas subi d'ajustement forcé. Cet argument est une généralisation de l'argument de Whewell selon lequel les prédictions réussies (d'un même genre de faits) sont un test important parce qu'elles prouvent que l'hypothèse qui y a mené ne reflétait pas que les données *passées* à partir desquelles elle avait été formulée.

On pourrait croire que la règle selon laquelle les prédésignations sont nécessaires sert seulement de garde-fou contre ce risque d'ajustement forcé des hypothèses à des données déjà connues. Mais pour Peirce il s'agit bien d'une *condition logique* de toute inférence statistique, parce qu'elle garantit que les inférences inductives et hypothétiques sont bien des reformulations valides de la déduction statistique :

Si la caractéristique P n'était pas prédésignée, la déduction dont notre induction est l'inversion apagogique ne serait pas valide ; c'est-à-dire que nous ne pourrions raisonner que si les M ne possédaient pas en général le caractère P , alors

il ne serait pas vraisemblable que les S possèdent aussi cette caractéristique³⁹.

C'est donc bien pour des raisons *logiques*, qui tiennent à la manière dont il justifie les méthodes inductive et hypothétique que Peirce est amené à sa position prédictiviste. C'est aussi ce qui fait la faiblesse de cette position : d'autres conceptions de l'induction ou des inférences statistiques que celles de Peirce n'ont pas à embrasser ce prédictivisme. Ce fut le cas des théories logiques de la confirmation qui se développèrent au XX^e siècle sur le fondement du calcul des probabilités, théories que l'on expose dans la section suivante.

Cependant, contrairement à ce que l'on pourrait croire, le prédictivisme de Peirce n'est pas aussi inconditionnel qu'il le semble au premier abord. En effet, à la fin du §8 de « *A Theory of Probable Inference* », Peirce remarque que si l'on formule des « hypothèses simples », c'est-à-dire qui attribuent *une* caractéristique frappante à de nombreux objets, ou de nombreuses caractéristiques à deux objets qui existent par ailleurs en grand nombre, alors il n'y a qu'une très faible probabilité que cette hypothèse ait été ajustée de manière forcée, même si l'on n'a pas pré-désigné ces caractéristiques. Autrement dit, le prédictivisme de Peirce est *conditionnel* : un test prédictif est indispensable pour confirmer une hypothèse sauf si celle-ci est suffisamment *simple* (dans le sens indiqué ci-dessus). Comme on le montre dans le chapitre suivant, ce prédictivisme conditionnel est la position actuellement dominante, bien que très peu de ses partisans (à l'exception notable de Deborah Mayo qui lui consacre un chapitre dans *Error and the growth of knowledge*) notent que Peirce est le premier à l'avoir explicitement soutenue.

En conclusion, c'est essentiellement le fait que Peirce ait le premier démontré qu'il était toujours possible de réaliser un ajustement forcé d'une hypothèse à n'importe quel type de données qui lui donne une place de premier rang dans le débat sur le prédictivisme. Sa position est donc intermédiaire entre les approches historique et logique de la confirmation. Ces deux approches se radicalisent au XX^e siècle avec le développement d'une part de logiques inductives fondées sur la logique mathématique

³⁹PEIRCE, "A Theory of Probable Inference", §8.

et le calcul de probabilité (section 6.2) et d'autre part des théories de la confirmation rejetant explicitement l'induction (section 6.3).

6.2 Les prédictions dans les théories logiques de la confirmation

De même que sont apparues, à la fin du XIX^e des logiques dites *mathématiques* à la fois parce qu'elles avaient les mathématiques pour modèle de formalisation et parce qu'elles avaient pour objectif de fonder les mathématiques et de clarifier les inférences déductives employées dans ces disciplines, de même sont apparues, au début du XX^e siècle, des logiques inductives qui avaient à la fois le calcul de probabilité pour modèle de formalisation et l'objectif de clarifier et de fonder la théorie mathématique des probabilités⁴⁰.

Dans cette abondante littérature sur la logique inductive et les fondements des probabilités qui constitue le fondement des conceptions *logiques* des théories de la confirmation, je ne m'intéresse qu'aux ouvrages qui traitent explicitement du problème de savoir si les prédictions ont un rôle particulier à jouer dans la confirmation des hypothèses. Cela ne signifie pas que la notion de prédiction n'a pas intéressé les auteurs impliqués dans ces projets au-delà des limites du problème du prédictivisme. Pour un mathématicien comme de Finetti par exemple, cette notion de prédiction est essentielle pour interpréter la probabilité d'un événement comme un degré de croyance subjectif⁴¹, mais c'est le problème de la portée des succès prédictifs — et non de la notion de prédiction dans toute son extension — qui fait l'objet de cette thèse et je ne peux, faute

⁴⁰On retrouve ce parallèle entre ces deux formalisations des logiques déductives et inductives dans de nombreux ouvrages de cette époque portant sur ce sujet : voir par exemple KEYNES, *A Treatise on Probability*, p.v, Carl HEMPEL, "Studies in the Logic of Confirmation (I.)", *Mind* 54.213 (1945), p. 1–26, p. 12, Nelson GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, trad. par Pierre JACOB, 2e édition (1966), Paris, Les Editions de Minuit, 1955, CARNAP, *Logical Foundations of Probability*, p.v

⁴¹Pour de Finetti en effet, la probabilité p d'un événement probable E est équivalente au prix qu'un individu serait prêt à échanger contre la somme pS dans l'éventualité où E se produit. Bruno de FINETTI, "La Prévision : ses lois logiques, ses sources subjectives", *Annales de l'institut Henri Poincaré* 7.1 (1937), p. 1–68, p. 6.

d'espace, rendre compte de tous les aspects de la théorie des probabilités qui font intervenir la notion de prédiction.

Dans un premier temps, je montre que les théories logiques de la confirmation qui se sont développées entre les années 1920 et les années 1960 se fondent sur le principe de pureté logique de la confirmation, énoncé par John Maynard Keynes (1883-1946), qui représente un argument solide en faveur de l'antiprédicativisme. Dans un deuxième temps, on examine un autre principe fondamental des théories de la confirmation, le principe de non-circularité, que Hempel a tenté d'utiliser comme un argument anti-prédicativiste. Enfin, on montre que le problème majeur des théories logiques de la confirmation que Nelson Goodman (1906-1998) a découvert et nommé « nouvelle énigme de l'induction » est lié à la question du rôle des prédictions dans la confirmation et peut servir d'argument en faveur des thèses prédictivistes.

6.2.1 Keynes et le principe de pureté logique de la confirmation

Au XX^e siècle, l'un des premiers auteurs à proposer une théorie logique des probabilités qui soit aussi une théorie de l'induction et de la confirmation formalisée à partir du calcul des probabilités, est John Maynard Keynes (1883-1946) qui publia en 1921 un *Treatise on probability* se présentant explicitement comme l'héritier des travaux à la fois de Mill et de Russell⁴².

En effet, Keynes conçoit la théorie des probabilités comme une forme de *logique* parce qu'elle a pour objet « le degré de croyance qu'il est rationnel d'attribuer dans certaines conditions » à la relation entre différents ensembles de propositions :

Étant donné un ensemble de connaissances directes qui constituent nos prémisses fondamentales, cette théorie nous dit quelles autres croyances rationnelles probables ou certaines on peut dériver, par un argument valide, de cette connaissance directe.

⁴²KEYNES, *A Treatise on Probability*, p.v.

Cela n'implique que des relations *purement logiques* entre les propositions qui expriment [*embody*] notre connaissance directe et celles par lesquelles on recherche une connaissance indirecte⁴³.

Ce passage du premier chapitre de l'ouvrage de Keynes montre que, puisque la théorie des probabilités est l'étude du degré de croyance en des relations logiques entre différents groupes de propositions, lorsqu'on examine la probabilité d'une inférence on ne doit considérer que les prémisses du raisonnement, sa conclusion et les relations logiques entre prémisses et conclusion.

Si l'on applique cette règle au cas de la confirmation dans lequel les prémisses sont des preuves notées *e* et la conclusion une hypothèse notée *h*, on obtient le principe de *pureté logique de la confirmation*⁴⁴ :

La confirmation d'une hypothèse par un ensemble de preuves est une relation qui n'implique que

1. Les propriétés intrinsèques de la ou des preuve(s) *e*
2. Les propriétés intrinsèques de la ou des hypothèse(s) *h*
3. Les relations logiques entre *e* et *h*

Même si ainsi formulé ce principe reste vague — notamment dans la définition de ce qui compte comme une « propriété intrinsèque » de *e* et de *h* ou comme une « relation logique » — on voit qu'il exclut tout élément du contexte historique dans lequel s'est déroulée la confirmation (qui a découvert *e*, qui a émis *h*, avec quels moyens techniques et financiers, etc.). Il met notamment de côté la question de savoir si *h* a été formulé avant *e* ou sans connaissance de *e*. Ce principe de pureté logique constitue donc un argument contre le prédictivisme que l'on peut formuler ainsi : on dit que *h* prédit *e* en s'appuyant sur des éléments de contexte et non sur les relations logiques entre *h* et *e* ; or seules ces relations et les propriétés intrinsèques de *h* et *e* sont pertinentes pour juger si *e* confirme *h* et à quel

⁴³KEYNES, *A Treatise on Probability*, chapitre 1, p. 3. Je souligne.

⁴⁴Je nomme ce principe ainsi d'après une suggestion de Kit Patrick, de l'Université de Bristol. Ce principe, même sous un autre nom, est omniprésent dans le débat contemporain sur le prédictivisme.

degré ; donc le fait que h prédise ou ne prédise pas e n'est pas pertinent pour juger si e confirme h et à quel degré. Cette objection de Keynes au prédictivisme est ce que l'on appelle dans cette thèse le *problème de Keynes* et il est clairement formulé dans le 25^e chapitre du traité.

Le mérite spécial des prédictions ou prédésignations est tout à fait imaginaire. Le nombre d'instances examinées et leur analogie sont les points essentiels et la question de savoir si une hypothèse particulière est proposée avant ou après leur examen tout à fait sans importance⁴⁵.

Mais ce qui est particulièrement intéressant dans la position anti-prédictiviste de Keynes est qu'il prend la peine d'expliquer pourquoi les prédictions *semblent* avoir un rôle particulier à jouer dans la confirmation des hypothèses, même si elles n'en ont d'après lui aucun. Keynes cite le problème soulevé par Peirce⁴⁶ (il est possible de trouver des hypothèses générales à partir de n'importe quel ensemble de données) et remarque que les chercheuses ont tendance à « "falsifier" [*to cook*] les preuves » pour qu'elles s'accordent à leur idées préconçues⁴⁷. Dans cette situation, il semblerait souhaitable que les données servant de preuves soient inconnues des chercheuses lorsqu'elles proposent leurs hypothèses, pour qu'elles ne soient pas tentés de procéder à ces ajustements et donc de considérer que les meilleurs tests pour une hypothèse sont les prédictions. C'est là l'origine de la prédilection *méthodologique* que l'on peut avoir pour les prédictions.

Mais, d'après Keynes, même s'il y a de bonnes raisons de croire qu'une hypothèse confirmée par une prédiction est plus confirmée qu'une hypothèse proposée à partir de données connues, *ce n'est pas en raison de la prédiction elle-même* mais parce que l'on estime que la personne qui a dérivé une prédiction d'une hypothèse a une bonne raison de croire en cette hypothèse. En effet, sans une telle raison, pourquoi cette personne aurait-elle confiance en cette hypothèse au point d'en dériver des prédictions ? C'est cette raison qui constitue un argument en faveur de cette

⁴⁵KEYNES, *A Treatise on Probability*, chapitre 25, p.349.

⁴⁶KEYNES, *A Treatise on Probability*, chapitre 25, p.348.

⁴⁷KEYNES, *A Treatise on Probability*, chapitre 25, p.350.

hypothèse et non la prédiction elle-même⁴⁸.

Ainsi, ce que montre Keynes, c'est que l'argument de Peirce en faveur du prédictivisme n'est qu'un conseil pratique de méthode si l'on admet le principe de pureté logique de la confirmation : prédésigner une hypothèse n'est utile que si l'on a une raison de croire que les preuves ou l'hypothèses ont été « falsifiées », sinon il n'y a pas de raison intrinsèque de considérer qu'un fait a plus de poids parce qu'il a été prédit.

6.2.2 Hempel et le problème de la circularité de la confirmation par les prédictions

Le principe de la pureté logique de la confirmation constitue l'argument le plus souvent objecté aux thèses prédictivistes. Ce principe a été étendu et diffusé notamment *via* la distinction entre contexte de la découverte et contexte de la justification définie par Hans Reichenbach dans le premier chapitre d'*Experience and prediction* (1938). Cette distinction entre les énoncés qui permettent de reconstruire une preuve logiquement valide et ceux qui ont guidé la découverte implique le principe de pureté logique de la confirmation.

Une autre objection aux thèses prédictivistes, distincte de celle de la question de la pureté logique, est que les prédictions ne peuvent pas *confirmer* une hypothèse ou une théorie parce qu'elles sont des *applications* d'hypothèses ou théories déjà confirmées. C'est dans les *Studies in the Logic of Confirmation* (1945) de Hempel que l'on trouve cet argument formulé le plus explicitement.

Dans cette série d'articles Hempel aborde le problème de définir le critère pour dire qu'une proposition en confirme une autre — tâche préalable avant d'aborder la question de savoir *en quelle mesure* cette proposition est confirmée. Parmi les critères examinés et rejetés par Hempel, il examine celui qu'il appelle le « critère prédictif »⁴⁹ [*prediction-criterion*], qu'il attribue à Ayer dans *Language, Truth and Logic* (1936). D'après ce

⁴⁸Cet argument de Keynes a été repris récemment par Eric Barnes dans le cadre d'une épistémologie pluraliste pour *soutenir* et non attaquer le prédictivisme. Voir Eric Christian BARNES, "Predictivism for pluralists", *The British journal for the philosophy of science* 56.3 (2005), p. 421–450.

⁴⁹HEMPEL, "Studies in the Logic of Confirmation (II.)", p. 97.

critère, une hypothèse est confirmée si l'on peut l'utiliser pour dériver un certain ensemble de données à partir d'un autre. Autrement dit, l'hypothèse H est confirmée par la classe B d'énoncés d'observation⁵⁰ si « B peut être divisée en deux sous-classes B_1 et B_2 mutuellement exclusives telles que B_2 n'est pas vide et que tout énoncé de B_2 peut être déduit de B_1 en conjonction avec H mais pas de B_1 seul »⁵¹. Si B est logiquement incompatible avec H alors cette hypothèse est réfutée par B et dans tous les autres cas B est neutre vis-à-vis de H .

Le problème de ce critère, selon Hempel, est qu'il est trop restreint pour servir de condition *nécessaire* pour définir la relation de confirmation. Confirmer les hypothèses contenant des quantificateurs universels dans leur antécédent à partir de leur prédiction est impossible sans tomber dans un cercle logique d'après Hempel. En effet, si H est l'hypothèse

$$\forall x(\forall yR_1(x, y) \rightarrow \exists yR_2(x, z)) \quad (6.1)$$

alors pour prédire que l'objet a est en relation R_2 avec un autre objet, il faudra d'abord prouver l'antécédent de H , c'est-à-dire prouver que a est en relation R_1 avec *tous* les objets de l'univers. Si l'on admet un nombre infini d'objets, on voit bien que l'on ne pourra jamais affirmer $\forall yR_1(a, y)$ et donc en dériver la prédiction $\exists zR_2(a, z)$. Pour tirer une prédiction d'une hypothèse telle que H , affirme Hempel, il faut au préalable que l'antécédent de H soit *déjà* confirmé. Si l'on veut faire des prédictions un critère de confirmation, on propose donc un critère *circulaire* pour des hypothèses comme H .

L'argument de Hempel est donc le suivant : on ne peut confirmer certaines hypothèses théoriques à partir des prédictions que l'on en tire, parce que ces prédictions supposent que ces hypothèses soient déjà confirmées. Or, un critère de confirmation ne devrait pas être circulaire. Donc le critère prédictif n'est pas un critère de confirmation valide (pour toutes

⁵⁰La question de savoir comment Hempel définit ces énoncés d'observation n'est pas importante ici, si ce n'est la condition nécessaire que ces énoncés ne peuvent être des propositions universelles.

⁵¹HEMPEL, "Studies in the Logic of Confirmation (II.)", p. 98. Il est intéressant de remarquer qu'ici Hempel n'adopte pas une conception temporelle mais heuristique des prédictions, contrairement à ce qu'il défend dans les *Studies in the Logic of Explanation*.

les hypothèses).

Si ce n'est un article de George Merrill intitulé « Confirmation and Prediction », paru en 1979, peu d'attention a été portée à l'argument de Hempel contre le critère prédictif de la confirmation. Pourtant, cet argument fait intervenir implicitement un des principes fondamentaux du modèle logique de la prédiction de Hempel (exposé et discuté dans le premier chapitre de cette thèse) selon lequel un raisonnement prédictif est un raisonnement dont les prémisses sont vraies ou confirmées empiriquement. C'est pour cela que les prédictions ne jouent pas de rôle particulier dans la confirmation des hypothèses d'après Hempel : on ne fait des prédictions qu'une fois que les jeux de la confirmation sont faits, que l'hypothèse a été acceptée et pas avant⁵². C'est pour cela que Hempel est antiprédictiviste en matière de confirmation : les prédictions ne pouvant jouer le rôle de test d'une hypothèse, elles n'ont donc aucun statut particulier dans sa confirmation⁵³.

De plus, comme le remarque Merrill, la restriction qu'impose Hempel aux prédictions aboutirait à la conclusion que les lois théoriques ne puissent tout simplement ne pas être confirmées dans toutes les situations où elles ne peuvent être testées indépendamment les unes des autres :

Il arrive (très souvent en réalité) qu'une hypothèse ne puisse être testée sans employer une seconde hypothèse qui ne peut elle-même être testée indépendamment de la première. Cette caractéristique des énoncés théoriques en science a incité Einstein et Infeld à remarquer que « c'est réellement notre système entier d'hypothèses qui est prouvé ou réfuté par l'expérience. Aucune de ces hypothèses ne peut être séparée pour être soumise à un test isolé. » [...]

⁵²Si Hempel insiste autant sur cette importance de la vérité des prémisses d'un raisonnement prédictif, c'est que les prédictions ne sont pas son objet principal : elles ne sont que le raisonnement symétrique par rapport aux explications dans l'optique de Hempel (voir section 1.1.1). Or, il est bien moins intuitif que les prémisses d'un raisonnement prédictif doivent être aussi vraies que celles d'un raisonnement explicatif.

⁵³Pour une reformulation — complexe mais valide — du critère prédictif de la confirmation exempte de circularité, voir George MERRILL, "Confirmation and Prediction", *Philosophy of Science* 46.1 (1979), p. 98–117, p. 103

Dans sa tentative pour éviter ce qu'il identifie (à tort) comme un raisonnement circulaire, Hempel s'efforce de rendre des hypothèses complexes confirmables d'un seul tenant [*in one blow*]. Mais le résultat est que la confirmation des hypothèses théoriques devient impossible⁵⁴.

Ainsi, même si le principe selon lequel la confirmation ne doit pas être une relation circulaire est sans aucun doute valide et qu'il est sans doute au fondement de l'attitude méfiante de Mill envers la méthode hypothétique par exemple, les arguments de Hempel pour prouver que le critère prédictif de la confirmation tombe sous les coups d'une accusation de circularité ne sont convaincants que dans son modèle logique des prédictions. C'est pourquoi le principe de circularité de la confirmation identifié par Hempel, s'il est en lui-même valide, n'est pas un défi majeur pour les conceptions prédictivistes qui n'acceptent pas le modèle hempélien de lois couvrantes. En revanche, si l'on accepte que les lois scientifiques peuvent réaliser des prédictions, les théories de la confirmation affrontent un problème majeur soulevé par Goodman qui peut être reformulé comme un argument en faveur du prédictivisme.

6.2.3 La nouvelle énigme de l'induction et la théorie de la projection de Goodman

Goodman appelle le problème qu'il soulève dans la troisième partie de *Faits, fictions et prédictions* la « nouvelle énigme de l'induction » parce qu'il concerne la question suivante : comment distinguer les hypothèses universelles qui sont confirmées par des observations et qui peuvent être utilisées pour faire des prédictions de celles qui ne le peuvent pas ? Goodman nomme les premières des hypothèses nomologiques et les secondes des généralisations accidentelles. L'exemple qu'il forge est resté célèbre : si l'on a un ensemble d'énoncés concernant un nombre fini d'émeraudes qui ont toutes été observées ayant la couleur verte, pourquoi considère-t-on qu'ils confirment l'hypothèse h :

⁵⁴MERRILL, "Confirmation and Prediction", p. 107-108. On revient, dans la section suivante, sur la notion de *holisme* utilisée implicitement par Merrill dans ce passage.

(*h*) : Toutes les émeraudes sont vertes

mais pas l'hypothèse *h'* :

(*h'*) : Toutes les émeraudes sont vleues

où « vleur » est un prédicat qui s'applique aux émeraudes vertes avant un instant *t* futur et aux émeraudes bleues après.

Cette énigme ne semble pas, au premier abord, concerner directement le débat sur le prédictivisme mais elle l'a significativement influencé parce que Goodman reformule dans la quatrième partie de son ouvrage la nouvelle énigme de l'induction en utilisant la notion de projections, c'est-à-dire d'inférences de cas connus vers des cas inconnus⁵⁵

Ce que nous recherchons, en fait, est une règle générale et précise permettant de déterminer quelles hypothèses sont confirmées par tel énoncé de preuves empiriques ou quelles projections nous sommes justifiés à faire à partir de cet énoncé⁵⁶.

Cette reformulation de la nouvelle énigme de l'induction montre que pour Goodman toute hypothèse nomologique est nécessairement projectible, c'est-à-dire peut légitimement être utilisée pour réaliser des prédictions concernant des cas inconnus (par exemple à partir de *h* on peut prédire « la prochaine émeraude examinée sera verte »). La question n'est pas de savoir s'il est possible ou correct de tirer des prédictions similaires de *h'* (par exemple : « la prochaine émeraude examinée sera vleur ») mais *pourquoi* on considère qu'une telle prédiction n'est pas légitime, c'est-à-dire pourquoi *h'* n'est pas *projectible*.

La manière dont Goodman propose de résoudre la nouvelle énigme de l'induction est bien prédictiviste en ce qu'elle donne un rôle spécifique aux succès prédictifs dans la confirmation des hypothèses.

Pour comprendre cela, il faut remarquer que la solution de Goodman repose sur deux prémisses :

⁵⁵Dans la terminologie de Goodman, une prédiction (*forecast*) désigne un énoncé portant sur un événement futur, une projection un énoncé portant sur un cas inconnu (voir GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 101). Goodman a donc une caractérisation temporelle des prédictions, mais rien n'empêche d'appeler comme on l'a fait jusqu'ici « prédiction » ce qu'il nomme « projection ».

⁵⁶GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 96.

1. Tout d'abord, pour Goodman, dans les énigmes de l'induction (l'ancienne, le problème de Hume, comme la nouvelle, la sienne) la question de la *justification* des inductions valides n'est pas distincte de la question de la *description* des inductions valides. En effet, pour justifier une inférence, qu'elle soit déductive ou inductive, on la compare aux règles qui norment cette inférence. Et réciproquement, pour justifier ces règles, on les compare à la pratique déductive ou inductive courante :

Nous semblons tourner en rond de façon flagrante. Il ne s'agit pas cette fois-ci d'un cercle vicieux : les règles, comme les inférences particulières, sont toutes deux justifiées par leur conformité réciproque. *On modifie une règle si elle engendre une inférence que nous ne sommes pas prêts à accepter ; on rejette une inférence si elle viole une règle que nous ne sommes pas prêts à modifier*⁵⁷.

Cette approche de l'induction implique que les pratiques prédictives réelles ont un poids majeur dans la question de savoir quelles hypothèses sont projectibles, puisque les règles de la confirmation doivent se conformer aux projections que l'on considère comme acceptables. Ainsi, le fait que les hypothèses nomologiques soient utilisées pour réaliser des prédictions réelles est fondamental pour justifier les règles de confirmation de ces hypothèses.

2. Ensuite, si Goodman adhère du bout des lèvres au principe de pureté logique de la confirmation en affirmant que « chaque cas particulier [de confirmation] concerne ainsi la relation existant entre les données (ou les preuves) et l'hypothèse considérée », c'est pour ajouter immédiatement après que « cela ne signifie pas que les seuls éléments dont nous disposons pour établir cette relation soient l'hypothèse et les preuves empiriques »⁵⁸. Autrement dit, Goodman admet que la relation de confirmation est aussi dépendante d'une

⁵⁷GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 80.

⁵⁸GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 96.

certaine connaissance d'arrière-plan. Il précise que cette connaissance d'arrière-plan est constituée des succès prédictifs passés d'une hypothèse : « il n'est pas question ici de preuves supplémentaires, mais plutôt de prédictions faites dans le passé et de leur résultat que nous avons consignés »⁵⁹.

La prémisse (2) permet à Goodman de séparer des hypothèses qui ont déjà servi par le passé à réaliser des prédictions qui ne se sont pas avérées fausses d'autres hypothèses qui n'ont pas eu ce rôle. Les prédicats apparaissant dans les premières sont dits mieux « implantés » que ceux apparaissant dans les secondes. La prémisse (1) permet alors de justifier que l'on préfère h (toutes les émeraudes sont vertes) à h' (toutes les émeraudes sont vides) précisément parce que h a été plus souvent utilisée pour faire des prédictions et que ses prédicats sont donc mieux implantés que ceux de h' ⁶⁰.

Chacune de ces prémisses montre qu'il est nécessaire de modifier en profondeur les théories logiques de la confirmation classiques pour résoudre le problème de l'induction : il faut admettre d'une part qu'elles doivent décrire les inférences inductives pour pouvoir les justifier et admettre d'autre part que la relation de confirmation ne comporte pas qu'une hypothèse et une preuve mais aussi un ensemble de connaissances d'arrière-plan.

Ces modifications sont majeures parce qu'elles font de la confirmation une relation *pragmatique* (et non purement *syntactique* ou *sémantique*), c'est-à-dire dépendante du contexte dans lequel se déroule la confirmation puisque l'implantation d'un prédicat dépend de ce contexte. Comme l'a montré P. Wagner en analysant un texte non publié de Carnap de la fin des années 1930⁶¹, cette position était aussi la sienne avant qu'il n'édifie une théorie logique de la confirmation dans les années 1940-1950 :

À cette époque, Carnap insista sur le fait que le concept de degré de confirmation était un concept pragmatique et non

⁵⁹GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 96.

⁶⁰Voir GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 104.

⁶¹Rudolf CARNAP, « Science and Analysis of Language », *The Journal of Unified Science* 9, La Haye, 1939 [non publié].

logique (sémantique). Il entendait par là que la confirmation d'un énoncé, à la différence de sa vérité, est relative à certains états spécifiques de la connaissance : « le jugement d'un degré de confirmation ne caractérise pas une situation objective mais plutôt l'état de connaissance d'une certaine personne par rapport à une certaine situation »⁶².

Carnap a ensuite changé de perspective sur la relation de confirmation⁶³, mais les travaux de Goodman (et, comme on le montre plus loin, d'autres philosophes) semblent revenir à cette conception pragmatiste de la confirmation qui oppose le caractère définitif de la vérité au caractère relatif de la confirmation.

Cette solution de Goodman est intéressante pour le prédictivisme à plusieurs titres. Tout d'abord elle met bien en lumière le fait que la relation de confirmation ne peut être définie sans faire intervenir d'autres éléments que l'hypothèse et sa ou ses preuves et qu'il faut en particulier prendre en compte les prédictions déjà réalisées. Goodman adopte donc bien une position prédictiviste au sens large, c'est-à-dire réserve bien une place spécifique aux prédictions dans la confirmation des hypothèses. Mais il ne s'agit pas ici de soutenir qu'une hypothèse qui a réalisé une prédiction réussie est mieux confirmée qu'une hypothèse qui n'aurait mené à aucune prédiction : pour Goodman le fait d'avoir réalisé des prédictions réussies est ce qui fait qu'une hypothèse est *projectible*, c'est-à-dire susceptible d'être confirmée par quelque moyen que ce soit.

Goodman illustre donc une forme de prédictivisme originale : une prédiction réussie ne confirme pas *directement* une hypothèse en augmentant le degré de confiance que l'on aurait en elle, mais elle contribue au fait que cette hypothèse possède une propriété indispensable à sa confirmation : la projectibilité. Cette forme de prédictivisme, parfois appelé *prédicti-*

⁶²WAGNER, "Carnap's Theories of Confirmation", p. 477.

⁶³Voir chapitre 1, section 1.3.2 pour une discussion du rôle des prédictions dans la théorie de la confirmation de Carnap, d'après laquelle il est possible de réaliser des prédictions en se passant de lois. Cela qui ne fait pas pour autant de Carnap un prédictiviste ou un anti-prédictiviste, puisque même s'il accorde une grande place aux prédictions dans l'activité scientifique, Carnap ne discute pas leur poids dans la confirmation des hypothèses.

*visme faible*⁶⁴, attribue aux prédictions le rôle de révéler une propriété intrinsèque d'une hypothèse qui, elle, joue un rôle direct dans sa confirmation. C'est ainsi que nous avons observé dans la partie précédente de cette thèse que les succès prédictifs qui ont compté dans l'histoire de la cosmologie sont ceux qui avaient révélé la capacité prédictive des hypothèses dont ils étaient dérivés et que c'est sur cette capacité prédictive que se fondaient les scientifiques pour projeter à nouveau cette hypothèse. La théorie de la projection de Goodman est donc particulièrement intéressante pour rendre compte du fait que les prédictions fécondes qui indiquent la capacité prédictive d'une théorie justifient le choix de cette théorie.

Cependant, la théorie de la projection de Goodman n'est pas sans soulever un certain nombre de questions. Je ne m'attarde ici que sur celles qui ont trait au problème de la confirmation des hypothèses par des prédictions.

En donnant la préférence aux prédicats déjà implantés, les règles proposées par Goodman pour départager les hypothèses nomologiques des généralisations accidentelles semblent exagérément conservatrices. Comment expliquer avec de telles règles l'introduction de nouveaux prédicats par de nouvelles théories ?

Pour Goodman, on peut introduire un nouveau terme dans un langage s'il a plus de succès dans ses projections ou s'il a la même extension qu'un terme déjà bien implanté. Ainsi, si j'introduis le terme « rayon R » pour désigner exactement les mêmes objets que le terme « rayon infra-rouge », ce nouveau prédicat sera aussi implanté que le prédicat « rayon infra-rouge ». En revanche, les prédicats « vert » et « vleur » n'ayant pas la même extension, l'implantation du prédicat « vleur » n'a pas bénéficié de tous les cas où le prédicat « vert » a été projeté.

Cette solution est intéressante, mais je ne suis pas sûr qu'elle réponde au problème. En effet, imaginons une théorie T qui introduit les prédicats P et Q . Cette théorie a mené à de nombreuses prédictions réussies et à aucun échec prédictif : ses prédicats sont donc bien implantés. Sup-

⁶⁴Voir HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 4.

posons maintenant qu'une théorie T' soit proposée qui ne soit qu'une reformulation de T (c'est-à-dire ayant la même base empirique, comme la reformulation de la dynamique newtonienne par Poisson). Cette théorie introduit entre autre les prédicats P' et Q' tels que l'extension de P' soit différente de celle de P et l'extension de Q' soit différente de Q , mais que l'extension de $P' \cup Q'$ soit identique à $P \cup Q$. D'après les règles de Goodman, P' et Q' ne peuvent pas bénéficier de la même implantation que P et Q ont acquise *via* les prédictions réalisées avec T . Pourtant il semble évident que dans certains cas, on peut préférer T' et donc les hypothèses utilisant P' et Q' , par exemple s'il est plus simple de réaliser certaines prédictions dans le langage de T' ⁶⁵.

Les accusations de conservatisme envers la notion d'implantation qu'utilise Goodman ne sont donc pas parfaitement infondées. Cela ne signifie pas que les règles qu'il propose sont à rejeter, mais il semble nécessaire d'étudier pourquoi, dans certaines situations, la projection de nouveaux prédicats permet de les implanter rapidement, c'est-à-dire de comprendre comment de nouvelles hypothèses semblent prouver leur capacité prédictive même en n'ayant que peu de succès prédictifs à leur actif.

6.2.4 Conclusion : la diversité des théories logiques de la confirmation

Parmi l'énorme quantité de travaux que l'on peut regrouper sous l'appellation, certes vague, de « théorie logique de la confirmation », on ne s'est intéressé ici qu'aux contributions au débat sur le prédictivisme de l'entre-deux-guerres aux années 1960. Une certaine continuité apparaît dans ces contributions, non seulement parce que leurs auteurs se connaissaient, collaborèrent et se citèrent, mais aussi parce que le principe que l'on a appelé *principe de pureté logique de la confirmation* semble être partagé

⁶⁵Un cas concret illustrant cette situation est celui de la reformulation discrète de la mécanique classique, qui permet une résolution plus simple des équations physiques par des ordinateurs. L'équivalence empirique des deux formulations de la mécanique est prouvée par Vincent Ardourel dans sa thèse *Les théories physiques face au calcul numérique : enjeux et conséquences de la mécanique discrète*. Voir aussi VINCENT ARDOUREL, "A discrete solution for the paradox of Achilles and the tortoise", *Synthese* 192.9 (2015), p. 2843–2861.

par tous.

Alors que le problème de la prétendue circularité de la confirmation à partir des prédictions n'en est un, comme on l'a vu, que si l'on se restreint à la conception hempelienne des prédictions, le principe de pureté logique de la confirmation constitue, avec le problème de Mill, l'une des principales objections au prédictivisme (que nous avons appelé problème de Keynes).

Cependant, même si le principe de pureté logique est un dénominateur commun à tous les auteurs étudiés dans cette section, on trouve des prédictivistes dans leur rang. L'énigme de l'induction présentée par Goodman révèle que la relation de confirmation est une relation à trois places : une hypothèse, une preuve et des connaissances d'arrière-plan. Or, l'inclusion de ces connaissances d'arrière-plan ouvre la porte à un possible rôle des prédictions dans la confirmation des hypothèses, tout en respectant le principe de pureté logique de la confirmation, comme c'est le cas dans la théorie de la projection de Goodman.

Ainsi, les théories logiques de la confirmation ne peuvent être toutes classées comme antiprédictivistes, mais fournissent des arguments autant que des objections à l'égard du prédictivisme. Comme nous allons le voir, il en va de même dans les conceptions du choix des hypothèses qui appartiennent à la tradition *historique* de la confirmation.

6.3 Les prédictions dans les théories historiques de la confirmation

Le point commun des théories historiques de la confirmation est moins une prise en compte de l'histoire des sciences réelles qu'une méfiance envers la notion d'induction définie comme une inférence logique allant de propositions particulières décrivant des observations à des propositions universelles servant d'hypothèse scientifique.

On retrouve ainsi dans cette tradition des auteurs qui s'opposent explicitement et ouvertement à l'induction, comme Duhem ou Popper, des auteurs qui modifient notablement le sens du mot induction, comme Whewell, ou des auteurs qui n'accordent à l'inférence inductive qu'une

place mineure dans leur épistémologie, comme Claude Bernard (1813-1878) pour qui « l'hypothèse expérimentale n'est que l'idée scientifique, préconçue ou anticipée et la théorie n'est que l'idée scientifique contrôlée par l'expérience »⁶⁶.

Comme dans la section précédente, je me concentre ici sur les auteurs qui ont explicitement abordé la question de la confirmation des hypothèses par des prédictions ou qui sont à l'origine d'arguments et de problèmes ayant eu un rôle majeur dans le développement du débat sur le prédictivisme par la suite.

6.3.1 Le prédictivisme paradoxal de Pierre Duhem

La conception de la théorie physique de Pierre Duhem (1861-1916) est connue pour son rejet de la méthode inductive exposé dans les paragraphes 5 et 6 du sixième chapitre de *La Théorie physique* :

C'est que deux écueils inévitables rendent impraticable au physicien la voie purement inductive. En premier lieu, nulle loi expérimentale ne peut servir au théoricien avant d'avoir subi une interprétation qui la transforme en loi symbolique ; et cette interprétation implique adhésion à tout un ensemble de théories. En second lieu, aucune loi expérimentale n'est exacte ; elle est seulement approchée ; elle est donc susceptible d'une infinité de traductions symboliques distinctes ; et parmi toutes ces traductions, le physicien doit choisir celle qui fournira à la théorie une hypothèse féconde, sans que l'expérience guide aucunement son choix⁶⁷.

Ainsi, comme Whewell, Duhem considère que l'expérience ne contraint en rien l'imagination du savant lorsqu'il imagine des postulats théoriques, puisque seules les conséquences de ces postulats permettent de les tester. C'est ainsi que la dynamique newtonienne n'a pas été, comme son auteur le prétend, confirmée par induction à partir des lois de Kepler mais par ses prédictions :

⁶⁶Claude BERNARD, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Garnier-Flammarion (1966), 1865, p. 55.

⁶⁷DUHEM, *La Théorie physique*, II, 6, §5, p. 303.

Le théoricien ne peut se contenter, pour justifier son choix, d'invoquer les lois de Kepler. S'il veut prouver que le principe qu'il a adopté est vraiment un principe de classification naturelle pour les mouvements célestes, il lui faut montrer que les perturbations observées s'accordent avec celles qui avaient été calculées d'avance ; il lui faut, de la marche d'Uranus, conclure l'existence et la position d'une planète nouvelle et, dans la direction assignée, trouver Neptune au bout de son télescope⁶⁸.

Cette référence à la prédiction de l'existence de Neptune par Le Verrier porte à croire que Duhem soutient un prédictivisme inconditionnel : les prédictions seraient pour lui les seuls tests valables qui peuvent justifier le choix d'une hypothèse. Cependant, si l'on est attentif à la distinction de Duhem entre lois expérimentales et lois théoriques, on se rend compte que sa conception du choix des hypothèses est une forme particulièrement originale de prédictivisme.

Si l'on repart de la définition donnée de la théorie physique comme une « classification naturelle d'un ensemble de lois expérimentales »⁶⁹, cela implique qu'il existe pour Duhem deux types de lois : les lois expérimentales et les lois théoriques, lesquelles ont pour charge non pas d'être des explications (c'est-à-dire de décrire les entités qui seraient causalement responsables des lois expérimentales) mais de relier ces lois les unes aux autres.

Cependant, les lois expérimentales ne sont pas, pour Duhem, des énoncés décrivant directement des faits expérimentaux :

Une expérience de Physique est l'observation précise d'un groupe de phénomènes accompagnée de l'INTERPRÉTATION de ces phénomènes ; cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques qui leur correspondent en vertu des théories admises par l'observateur⁷⁰.

⁶⁸DUHEM, *La Théorie physique*, II, 6, §4, p. 296.

⁶⁹DUHEM, *La Théorie physique*, II, 1, §1, p. 157.

⁷⁰DUHEM, *La Théorie physique*, II, 3, §2, p. 222.

En représentant des faits concrets par des abstractions et des symboles, l'expérimentateur qui formule une loi ne peut donc en rendre une image parfaitement fidèle, mais seulement une représentation approchée. Cela a pour conséquence que le même fait observé est compatible avec une infinité de traductions et donc de lois expérimentales possibles. L'exemple que prend Duhem est celui de la course du Soleil dans le ciel : si l'on détermine le mouvement apparent du centre du Soleil avec une précision d'une minute d'arc, alors « pour représenter la marche du Soleil, bien que l'astre n'occupe à chaque instant qu'une seule position, nous pourrions donner, à chaque instant non pas une seule valeur de la longitude et de la latitude mais une infinité de valeurs de la latitude et de la longitude ; seulement, pour un même instant, deux valeurs acceptables ne pourront différer entre elles de plus d'une minute d'arc »⁷¹.

Le fait qu'une loi expérimentale soit symbolique et approchée et qu'à un fait concret puisse correspondre une infinité de faits théoriques (et réciproquement) est le premier argument que Duhem oppose à la méthode de l'induction (voir citation de la page 303 donnée ci-dessus). De plus, cet argument implique que l'on ne peut pas distinguer les prédictions des différentes lois expérimentales si leur différence de précision est inférieure à la marge d'erreur des instruments utilisés pour observer le phénomène censé les départager. Dans ce cas, comme le remarque Duhem, le choix d'une hypothèse expérimentale ne fait pas intervenir que les prédictions mais aussi sa simplicité et son accord avec des théories déjà admises. Duhem n'est donc pas prédictiviste en ce qui concerne la confirmation des lois expérimentales.

Les prédictions servent essentiellement, pour Duhem, à la confirmation des hypothèses théoriques chargées d'organiser les lois expérimentales. Mais parmi les objections que Duhem oppose à la méthode inductive de Newton, il y a l'argument qu'il est impossible de généraliser une hypothèse isolée des autres, parce que la traduction d'un fait concret en fait théorique suppose « l'adhésion à tout un ensemble de lois théoriques »⁷².

⁷¹DUHEM, *La Théorie physique*, II, 5, §2, p. 257.

⁷²DUHEM, *La Théorie physique*, II, 6, §5, p.303.

Cet argument a souvent été appelé « problème de Duhem » ou « holisme de Duhem » parce qu'il a pour conclusion que seule une théorie dans son ensemble peut être comparée à l'expérience. Il repose sur le fait que le physicien ne peut pas réaliser une prédiction de loi expérimentale à partir d'une hypothèse théorique sans utiliser des hypothèses auxiliaires. Ainsi, lorsqu'une expérience valide ou invalide une prédiction, elle confirme ou réfute l'*ensemble* des hypothèses qui ont servi à dériver cette prédiction :

Le physicien ne peut jamais soumettre au contrôle de l'expérience une hypothèse isolée, mais seulement tout un ensemble d'hypothèses ; lorsque l'expérience est en désaccord avec ses prévisions, elle lui apprend que l'une au moins des hypothèses qui constituent cet ensemble est inacceptable et doit être modifiée ; mais elle ne lui désigne pas celle qui doit être changée⁷³.

Pour Duhem, cet argument suffit à faire de la question de la confirmation non pas un problème de logique mais de *bon sens*. Dans la partie précédente de cette thèse, on a déjà fait remarquer que puisqu'un physicien peut toujours éviter la réfutation de sa théorie face à un échec prédictif en y ajoutant ou en modifiant certaines des hypothèses auxiliaires qui ont mené à la prédiction erronée, ce n'est pas la logique qui force un scientifique à abandonner une théorie mais, d'après Duhem, la crainte de « manquer de bon sens »⁷⁴.

Ainsi Duhem, comme Whewell, remarque qu'une théorie dont les prédictions sont mises en échec n'a pas le même développement historique qu'une théorie dont les prédictions sont couronnées de succès puisque son niveau de complexité augmente avec ses échecs. Mais à la différence de Whewell, Duhem n'admet pas que cette complexité soit le signe de la fausseté de cette théorie : c'est uniquement un facteur psychologique qui pousse ses partisans à l'abandonner.

Au final, l'impact des prédictions réussies sur la confirmation d'une hypothèse n'est pas d'augmenter la probabilité d'une hypothèse pour

⁷³DUHEM, *La Théorie physique*, II, 6, §2, p. 284.

⁷⁴DUHEM, *La Théorie physique*, II, 6, §10, p. 330.

Duhem : c'est un impact purement psychologique qui décrédibilise les hypothèses concurrentes. Mais cela ne pose pas de problème à Duhem puisque la confirmation des hypothèses est en dernière instance, pour lui, un problème psychologique : il s'agit de savoir quand est-ce que le bon sens nous ordonne d'abandonner une théorie. Or le bon sens duhémien est une qualité morale et non rationnelle (voir chapitre 4, section 4.3). Ainsi, pour le dire dans les termes de Pascal, la confirmation relève de l'ordre du cœur et non de la raison⁷⁵.

La conception qu'a Duhem du choix des hypothèses est donc un prédictivisme paradoxal, qui donne une place importante aux prédictions dans la confirmation des hypothèses, mais considère que leur influence est toute psychologique :

1. Duhem illustre le fait que l'on peut concilier un antiprédictivisme concernant le test des lois expérimentales — c'est-à-dire des prédictions de phénomènes particuliers à partir de généralisations empiriques — et un prédictivisme inconditionnel concernant le test des lois théoriques — c'est-à-dire des prédictions de généralisations empiriques à partir d'ensembles d'hypothèses universelles.
2. Duhem ne résout pas le problème de Mill et semble même le renforcer en faisant de la confirmation des hypothèses par des prédictions réussies une question d'impact psychologique et de bon sens.

C'est le holisme de Duhem qui est responsable de ce prédictivisme paradoxal, puisqu'il en suit qu'il n'y a pas d'implication logique entre la réussite ou l'échec d'une prédiction et l'adoption ou le rejet de cette théorie. Cependant, comme on l'a déjà remarqué dans la section 3 du chapitre 4 de cette thèse, ce n'est pas parce qu'un échec prédictif ne contraint pas *logiquement* (au sens de la logique déductive) à abandonner une théorie que l'on doit forcément en conclure que le choix des hypothèses est une affaire de faculté morale qui « échappe à l'analyse ». Duhem remarque lui-même que la complexification continue d'une théorie pour échapper

⁷⁵On comprend alors pourquoi le dernier chapitre de *La Théorie physique* qui porte sur le choix des hypothèses ne se présente ni comme une logique ni comme une méthode mais comme une description des processus psychologiques par lesquels les hypothèses germent inconsciemment dans l'esprit du physicien.

à une réfutation la rend rapidement impraticable : la question est alors de savoir si l'on ne peut pas rendre rationnellement compte de l'abandon d'une telle théorie sans faire appel aux effets psychologiques des échecs prédictifs. Et c'est précisément cette question qui est au centre des théories de la confirmation basées sur la *réfutation* des hypothèses qui se sont développées en réaction aux théories de la confirmation basées sur des logiques inductives.

6.3.2 Les prédictions dans la théorie de la réfutation de Popper

Le fondateur et principal représentant des théories de la réfutation est Popper, dont l'épistémologie repose sur un refus de toute forme de méthode d'inférence inductive ou de logique inductive pour rendre compte de l'activité scientifique (voir chapitre 4 section 4.2.1). Il s'en explique clairement dans une note publiée en appendice de *La Logique de la découverte scientifique* :

Je crois que toute théorie [de l'induction] — qu'elle utilise la logique classique ou la logique des probabilités — doit pour des raisons purement logiques, mener soit à une régression à l'infini, soit à un principe *a priori* de l'induction, un principe synthétique qui ne peut être testé empiriquement. [...] Une théorie de l'induction est superflue. Elle n'a aucune fonction dans une logique de la science⁷⁶.

Ce rejet mène directement Popper, en l'espace de quelques lignes, à faire une déclaration prédictiviste :

Le mieux que l'on puisse dire à propos d'une hypothèse est qu'elle a été jusqu'à présent capable de prouver sa valeur et qu'elle a été plus couronnée de succès que d'autres hypothèses, bien qu'en principe on ne puisse jamais la justifier, la vérifier ou même prouver qu'elle est probable. Cette évaluation de l'hypothèse repose seulement sur les conséquences

⁷⁶POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, p. 316-317.

déductives (les prédictions) qui peuvent être tirées de l'hypothèse. Il n'est même pas nécessaire de mentionner l'induction⁷⁷.

Cette citation de Popper est intéressante à plus d'un titre :

- D'une part elle identifie *conséquences prédictives* et *prédictions*, ce qui montre que Popper n'a pas une définition purement *temporelle* des prédictions (contrairement à ce que soutient S. Brush, voir section 4.1).
- D'autre part, elle appuie l'idée selon laquelle la méthode scientifique serait purement hypothético-déductive — ce qu'affirme Popper lui-même dans le premier chapitre de *La Logique de la découverte scientifique* — et basée sur un prédictivisme inconditionnel.
- Enfin, elle semble montrer que Popper est parfaitement conscient des défauts de toute théorie hypothético-déductive de la confirmation puisqu'il refuse de faire de sa conception de l'évaluation des hypothèses une théorie de la confirmation et affirme même qu'il est impossible de prouver qu'une hypothèse est plus probable qu'une autre.

On lit souvent, dans des expositions à visée pédagogique des travaux en théorie de la confirmation au XX^e siècle, qu'à côté de la position de Hempel (souvent appelée « instancialisme ») et de Carnap (basée sur une logique des probabilités), il existerait une autre conception de la confirmation, souvent appelée « hypothético-déductivisme »⁷⁸ fondée sur l'idée qu'une hypothèse h est confirmée par la preuve e si et seulement si h implique logiquement e .

Une telle conception de la confirmation serait morte-née. Parmi toutes les difficultés qu'elle aurait à affronter, le premier serait le problème de Mill : affirmer que $(h \rightarrow e) \wedge e$ suffit à confirmer h est le sophisme logique bien connu de l'affirmation de l'antécédent. Cela conduit rapidement à des conséquences difficilement admissibles : si l'on admet $h \rightarrow e$, alors il

⁷⁷POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, p. 317.

⁷⁸COZIC, "Confirmation et induction", p. 75.

faut aussi admettre $(h \wedge h') \rightarrow e$ et $(h \vee h') \rightarrow e$, quelle que soit h' . Autrement dit, une théorie hypothético-déductive de la confirmation semble incapable de trier entre les hypothèses concurrentes à partir d'une preuve donnée, ce qui est pourtant un des premiers objectifs de toute théorie de la confirmation. Les présentations de cette théorie de la confirmation finissent donc souvent par remarquer que cette conception est si grossière et incohérente qu'elle n'a probablement jamais été soutenue par aucun philosophe ayant abordé la question de l'évaluation des hypothèses — ce qui explique que nous ne l'ayons pas rencontrée jusqu'à présent dans ce chapitre.

La conception qu'a Popper de l'évaluation des hypothèses est, en revanche, une forme cohérente et conséquente d'hypothético-déductivisme puisqu'elle rejette toute *confirmation* d'une hypothèse par la vérification de ses prédictions. Popper fait en effet remarquer que conclure quoi que ce soit de *positif* sur h à partir de la vérité de e est un sophisme, mais que par contre l'inférence

$$((h \rightarrow e) \wedge \neg e) \rightarrow \neg h$$

est, elle, parfaitement valide. Autrement dit, si la logique déductive nous empêche de rien tirer d'une vérification expérimentale d'une prédiction à propos de la vérité de l'hypothèse à partir de laquelle elle a été faite, elle nous permet de remonter de l'échec de cette vérification expérimentale à la fausseté de l'hypothèse. C'est pourquoi Popper affirme à plusieurs reprises que sa conception de l'évaluation des hypothèses est *négative* et repose sur le *modus tollens* et non sur le *modus ponens*⁷⁹.

Popper dissout ainsi le problème de Mill : il n'y a aucune *contradiction logique* à utiliser les prédictions pour réfuter les hypothèses et le problème de Mill ne se pose pas tant que l'on ne cherche pas à affirmer la *vérité* des hypothèses évaluées *via* leurs prédictions.

De même, la position de Popper semble, au premier abord, éviter le problème de Keynes (aucune relation non logique ne doit intervenir dans l'évaluation d'une hypothèse et de ses preuves). En effet, pour Popper, une prédiction est par définition la conséquence logique d'une hypothèse.

⁷⁹POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, chapitre 1, §6, p. 19.

Ainsi, dans le dixième chapitre de *La Logique de la découverte scientifique*, Popper répond à Keynes que « sa conception des prédictions est certainement consistante mais que l'on se demande pourquoi on devrait la généraliser »⁸⁰. Keynes a une conception temporelle des prédictions : ne comptent pour lui comme prédictions que les conséquences qui ont été tirées d'une hypothèse avant leur vérification. Popper remarque que cette conception amène Keynes à un écueil dans lequel plonge, d'après lui, toutes les logiques inductives : une hypothèse est d'autant plus certaine qu'elle est peu générale, c'est-à-dire qu'elle porte sur un domaine d'objets restreint et peu varié. Autrement dit « si ce à quoi on donne le plus de valeur est la connaissance la plus sûre possible — et que les prédictions ne contribuent en rien à la corroboration — pourquoi n'en restons-nous pas à nos énoncés de base non théoriques »⁸¹ ?

Cette remarque de Popper éclaire la distinction entre ce que les partisans de la tradition logique de la confirmation considèrent comme la confirmation d'une hypothèse (sa fiabilité) et ce que Popper appelle la « corroboration » d'une hypothèse. La corroboration n'est pas une mesure de la *probabilité* d'une hypothèse (puisque pour Popper une telle mesure est impossible) mais de sa *testabilité*. Ainsi, le degré de corroboration d'une hypothèse ou d'une théorie n'est pas son degré de confirmation mais une évaluation de sa capacité à être testée par rapport à d'autres hypothèses concurrentes.

Cette théorie de la corroboration rencontre des problèmes qui n'ont pas été soulevés par les partisans des théories logiques de la confirmation, mais par ceux des théories historiques de la confirmation :

1. Comme on l'a vu dans la sous-section précédente consacrée à Duhem, une hypothèse isolée ne peut pas être soumise à un réel test empirique, puisqu'un certain nombre d'hypothèses auxiliaires sont nécessaires pour dériver une prédiction et d'autres pour formaliser le dispositif expérimental de test. Cela permet, en cas de réfutation, de rejeter la faute sur l'une ou l'autre de ces hypothèses.

⁸⁰POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, chapitre 10, §83, p. 271.

⁸¹POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, chapitre 10, §83, p.272. Dans la terminologie de Popper, les « énoncés de base non théoriques » sont ceux utilisés pour décrire les expériences scientifiques et leurs résultats.

2. D'autre part, il est toujours possible, comme l'avait aussi remarqué Duhem, de rajouter des hypothèses *ad hoc* destinées uniquement à échapper à la réfutation d'une théorie.
3. Enfin, l'histoire des sciences ne semble pas exposer de cas clairs et explicites de réfutation, puisque, comme on l'a vu dans la partie précédente (section 4.3.1), les expériences capables de réfuter de manière satisfaisante une théorie ne sont bien souvent possibles techniquement que longtemps après que cette théorie a été de fait acceptée ou rejetée par la communauté scientifique.

Popper répond aux objections 1. et 2. en affinant son concept de prédiction : ce sont les prédictions *risquées* seulement qui comptent comme des *tests sévères* et qui peuvent jouer un rôle dans l'évaluation des hypothèses. Un test sévère est un test qu'une théorie semble avoir peu de chances de passer avant qu'il soit réalisé.

Mais cette caractérisation des tests sévères réintroduit, dans la théorie poppérienne, un élément temporel (puisque l'on doit définir la probabilité de réussite du test *avant* sa réalisation, probabilité différente de sa probabilité *après* la réalisation) qui non seulement fait resurgir le problème de Keynes, mais en plus lui fait prêter le flanc à l'objection 3., formulée par Kuhn et Lakatos : est-ce que de tels tests sévères jouent *réellement* un rôle si important que cela dans la pratique scientifique ? Est-ce qu'ils ne sont pas une condition suffisante mais non nécessaire de l'acceptation d'une théorie ?

C'est pour résoudre ce problème que Lakatos, élève de Popper, en vint à développer une nouvelle théorie historique de la confirmation dans laquelle les prédictions jouent explicitement un rôle indispensable.

6.3.3 Les prédictions dans la méthodologie des programmes de recherche scientifiques de Lakatos

La philosophie de Lakatos se pense en partie dans la continuité de celle de Popper et il a lui-même intitulé sa position un « réfutationisme sophistiqué ». Cependant, Lakatos s'est progressivement éloigné des positions de

Popper en développant la « méthodologie des programmes de recherche. » Comment se distingue-t-elle de la théorie de la réfutation de Popper ?

Les soi-disant « réfutations » ne sont pas comme le prétend Popper la caractéristique des échecs empiriques, parce que tout programme se développe dans un océan d'anomalies. Ce qui compte réellement, ce sont les prédictions spectaculaires, inattendues et sensationnelles ; quelques-unes de ces prédictions sont suffisantes pour faire pencher la balance ; là où une théorie est à la traîne des faits, on a affaire à un misérable programme de recherche dégénératif⁸².

Exprimée ainsi, on voit mal en quoi la position de Lakatos diffère de celle de Popper, puisque lui aussi donne beaucoup de poids aux prédictions et soutient un prédictivisme inconditionnel.

Mais pour Lakatos, il est impossible de donner autant de poids que Popper le fait aux prédictions *risquées* (celles qui pourraient entraîner une réfutation). En effet, comme Lakatos le dit, toute théorie naît dans un « océan d'anomalies ». La théorie de Newton par exemple, si on la réduit aux trois lois de la dynamique et à l'hypothèse de l'attraction gravitationnelle, est réfutée de 1687 (date de sa publication) à 1752 (date des travaux de Clairaut) par le mouvement de la Lune.

L'originalité de Lakatos est d'éviter ce problème en prenant pour unité d'analyse non pas *une* théorie, considérée comme un ensemble d'hypothèses, mais une *série* de théories se remplaçant les unes les autres. Cette série forme ce que Lakatos nomme un « programme de recherche scientifique » si elles partagent un « noyau dur » d'hypothèses en commun et ne diffèrent que par les hypothèses auxiliaires qu'elles utilisent comme un « glacis protecteur » pour éviter d'être réfutées par l'océan d'anomalies dans lequel baigne le noyau dur.

Ainsi, non seulement Lakatos n'évite pas le problème soulevé par Duhem (la nécessité d'hypothèses auxiliaires pour tirer des prédictions d'un ensemble d'hypothèses théoriques), mais il montre en plus quel rôle positif peuvent jouer ces auxiliaires dans l'évaluation d'un programme de

⁸²Imre LAKATOS, *The Methodology of scientific research programmes*, t. 1, Cambridge, Cambridge University Press, 1980, p. 6.

recherche. Effectivement, il est toujours possible d'échapper aux réfutations en ajoutant ou modifiant des hypothèses auxiliaires, mais c'est une bonne chose puisque cela donne aux théories l'occasion de montrer qu'elles sont intéressantes, utiles et fécondes même si elles ne sont pas en accord immédiat avec les faits.

Cependant, le problème de Peirce persiste : si l'on autorise n'importe quel ajout ou modification du glaciis protecteur d'un programme de recherche, comment distinguer les hypothèses *ad hoc* qui ne visent qu'à faire des ajustements forcés — ceux dénoncés par Peirce (voir section 6.1.5) — entre une théorie et des données, d'hypothèses auxiliaires qui font réellement progresser le programme de recherche ?

C'est là que les prédictions entrent en ligne de compte : un programme de recherche ne progresse, d'après Lakatos, que s'il permet des prédictions de *faits nouveaux et inattendus*, comme le retour de la comète de Halley ou la dérivation des rayons lumineux d'étoiles lointaines par le Soleil⁸³.

On a insisté, à la fin du premier chapitre de cette thèse (voir section 1.4.1) sur la nécessité d'intégrer à toute conception des prédictions un tant soit peu informée par l'activité scientifique les hypothèses auxiliaires — notamment celles qui décrivent les conditions aux limites. Lakatos semble prendre cette nécessité au sérieux et sa méthodologie des programmes de recherche se fonde sur la distinction entre des hypothèses auxiliaires inutiles et d'autres fécondes, menant à de nouvelles découvertes.

Lakatos soutient donc un prédictivisme inconditionnel bien particulier puisqu'il n'est pas défini au niveau des lois expérimentales, ni même des lois théoriques, mais au niveau des *séries* de théories. Les tests prédictifs sont indispensables non pas pour accepter, rejeter ou juste évaluer des énoncés théoriques isolés ou même des théories isolées : ils le sont lorsqu'on cherche à évaluer l'évolution d'un programme de recherche, c'est-à-dire pour savoir s'il a été, sur le long terme, en progrès ou en dégénérescence.

Autrement dit, pour Lakatos, la question de l'évaluation des théories et de la démarcation entre sciences et pseudo-sciences n'est pas une

⁸³LAKATOS, *The Methodology of scientific research programmes*, p. 5.

question de *statique* (est-ce que telles preuves confirment ou infirment telle hypothèse ou telle théorie ?) mais une question de *cinématique* (est-ce que telle ou telle preuve indique que cette théorie appartient à un programme en progrès, à l'arrêt ou en dégénérescence ?) :

Au lieu d'évaluer des théories, [le falsificationnisme sophistiqué] évalue des séries de théories, qui peuvent seules être dites scientifiques ou non scientifiques ; appliquer l'épithète de « scientifique » à une unique théorie est une erreur de catégorie. Le critère adopté de tout temps pour considérer qu'une théorie est satisfaisante est qu'elle s'accorde avec les faits observés. Pour une série de théories, notre critère empirique est qu'elle doit produire des faits nouveaux. L'idée de développement et le concept de caractère empirique sont fondus en un seul concept⁸⁴.

La méthodologie des programmes de recherche de Lakatos échappe ainsi au problème de Mill, que Lakatos cite pour montrer qu'accorder une préférence aux prédictions dans l'évaluation d'une hypothèse n'a pas pour objectif de *prouver* cette hypothèse mais son caractère non *ad hoc*⁸⁵. L'objectif de la méthodologie des programmes de recherche n'est donc pas de prouver que telle hypothèse ou telle théorie est prouvée par une prédiction réussie mais uniquement que cette prédiction montre que le programme de recherche est en progrès, qu'il permet de découvrir de nouveaux phénomènes et d'acquérir de nouvelles connaissances, ce qui constitue des fins en soi de la science.

Mais la méthodologie des programmes de recherche n'échappe pas en revanche au problème de Keynes : on voit mal pourquoi le fait qu'une théorie ou un programme de recherche ait permis de découvrir un nouveau phénomène devrait contribuer à l'avantager par rapport à un autre programme de recherche qui serait à la traîne des faits. On peut très bien imaginer deux chercheurs, Alice et Bob, qui ajoutent une même hypothèse à un programme de recherche partageant le même noyau dur.

⁸⁴Imre LAKATOS, *Histoire et méthodologie des sciences*, trad. par Catherine MALAMOU, Paris, Presses Universitaires de France, 1994, p. 42-43.

⁸⁵LAKATOS, *Histoire et méthodologie des sciences*, p. 50.

Alice le fait avant que soit connu un phénomène qui est une conséquence de cette hypothèse, Bob après. Dans ce cas, la méthodologie des programmes de recherche semble aboutir à une incohérence logique : le programme d’Alice est progressif, celui de Bob est dégénératif, alors qu’ils sont constitués des mêmes hypothèses.

C’est la prise de conscience de ce problème qui a amené Lakatos et ses disciples à aborder les premiers la question qui est à l’origine du débat moderne sur le prédictivisme : à quelles conditions peut-on dire qu’un phénomène a été prédit par une hypothèse et que l’on a affaire à une prédiction d’un fait nouveau ? Autrement dit, quelles sont les différentes définitions que l’on peut donner des prédictions et quel type de prédiction est important dans le contexte de la confirmation ?

6.4 Le fondement du débat actuel sur les prédictions : le problème des preuves déjà connues (*old evidence*)

Lorsque A. Musgrave écrivit en 1974 l’article « Logical versus Historical Theories of Confirmation » il mit en lumière et formalisa un problème déjà soulevé par Élie Zahar quelques mois plus tôt dans une étude d’inspiration lakatosienne de la théorie de la relativité restreinte⁸⁶ : on ne peut pas définir les prédictions de manière strictement temporelle. Étonnamment, ce problème se pose aussi bien aux théories historiques qu’aux théories logiques de la confirmation, puisque Clark Glymour l’a redécouvert indépendamment en 1980 en étudiant les théories logiques de la confirmation aujourd’hui majoritaires : les théories bayésiennes de la confirmation⁸⁷. Ce problème est connu aujourd’hui sous le nom de « *problem of old evidence* » que l’on peut traduire par « problème des données déjà connues » ou « problème des preuves déjà connues ».

Ainsi, au moment où Musgrave conceptualisa la distinction entre des

⁸⁶Elie ZAHAR, “Why did Einstein’s Programme supersede Lorentz’s ? (I)”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.2 (1973), p. 95–123.

⁸⁷Clark GLYMOUR, *Theory and evidence*, Princeton, Princeton University Press, 1980.

théories historiques et logiques de la confirmation, cette distinction était en train de s’effacer du débat sur le prédictivisme, débat qui prenait un nouveau visage : il ne s’agirait plus de savoir si les prédictions comptent plus que les autres moyens d’évaluer une hypothèse, mais de savoir *quelles* prédictions jouent un rôle important dans leur confirmation.

6.4.1 Le problèmes des preuves déjà connues dans la méthodologie des programmes de recherche

En 1973, É. Zahar, élève de Lakatos, publie deux articles⁸⁸ ayant pour objectif d’appliquer la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos à la question suivante : pourquoi la théorie de la relativité restreinte d’Einstein a-t-elle supplanté la théorie concurrente de Hendrik Lorentz (1853-1928) au début du XX^e siècle et s’est-elle imposée comme la théorie décrivant l’électrodynamique des particules en mouvement ?

Si cette étude reprend en grande partie la méthodologie définie par Lakatos, elle s’en éloigne sur un point majeur : elle critique la définition *temporelle* des prédictions, qui consiste à décrire théoriquement un phénomène *avant* sa découverte empirique. En effet, comme le fait remarquer É. Zahar, cette conception des prédictions a une conséquence fâcheuse : aucune preuve déjà connue ne peut compter dans la confirmation d’un programme de recherche, puisque la méthodologie des programmes de recherche est un prédictivisme inconditionnel qui n’admet pas d’autre forme de succès d’un programme de recherche que des prédictions réussies. Ainsi, si l’on en reste à une description temporelle des prédictions, ni le programme de recherche de Lorentz ni celui d’Einstein ne pouvaient être considérés comme progressifs en 1905 puisque leur conséquence empirique est que la lumière est une constante universelle (sa vitesse est invariante, quel que soit le référentiel choisi), phénomène découvert par Albert Michelson (1852-1931) en 1881. Pourtant, le succès principal des théories de Lorentz et d’Einstein est précisément de pouvoir décrire théoriquement ce phénomène et c’est ce qui a le plus contribué à leur accep-

⁸⁸ZAHAR, “Why did Einstein’s Programme supersede Lorentz’s? (I)”. Elie ZAHAR, “Why did Einstein’s Programme supersede Lorentz’s? (II)”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.3 (1973), p. 223–262.

tation par la communauté des physiciens.

Mais si l'on accepte de considérer les données déjà connues comme des preuves, ne risque-t-on pas de tomber dans la difficulté soulevée par Peirce (voir section 6.1.5) : on peut *toujours* ajuster une hypothèse à un ensemble de données déjà connues de manière à faire apparaître de nouvelles relations entre ces données. É. Zahar commence par reprendre ce problème — sans citer le texte de Peirce :

Soit un ensemble de faits et une théorie $T[\lambda_1, \dots, \lambda_n]$ qui contient un nombre approprié de paramètres. Bien souvent, les paramètres peuvent être ajustés de manière à produire une théorie T^* qui « explique » les faits donnés. Il se peut même que, si l'on dispose de suffisamment de degrés de liberté, de nouvelles relations spectaculaires entre les anciens faits soient exhibées (ou plutôt fabriquées). [...]

Dans un tel cas, on devrait certainement dire que ces faits n'apportent qu'une piètre preuve, voire aucune, à la théorie, puisque la théorie est spécifiquement conçue pour rendre compte de ces faits⁸⁹.

Il est *trop simple* de se contenter de trouver de nouvelles relations entre des données déjà connues mais il est indispensable, d'un point de vue historique, d'admettre que des données déjà connues peuvent jouer le rôle de preuves. É. Zahar est donc amené à reformuler la relation de nouveauté qu'il doit y avoir entre une hypothèse h et un phénomène e pour que l'on puisse dire que h a prédit e :

Un fait sera considéré comme nouveau par rapport à une hypothèse donnée s'il n'appartient pas à la situation problématique [« problem situation »] ayant guidé la construction de cette hypothèse⁹⁰.

Autrement dit, É. Zahar propose une nouvelle définition de ce que signifie la *nouveauté* lorsqu'on parle de *prédiction d'un nouveau fait*. Pour

⁸⁹ZAHAR, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)", p. 102-103.

⁹⁰ZAHAR, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)", p. 103.

lui, une hypothèse h prédit un phénomène e si h n'a pas été construite dans le seul but de rendre compte de e . Même si cette définition était déjà implicitement contenue dans la définition de la consilience des inductions de Whewell, É. Zahar est le premier à admettre explicitement que la *nouveauté temporelle* n'est pas la seule manière de caractériser une prédiction réussie : ⁹¹

Lakatos accueille la redéfinition des nouvelles prédictions « au sens de Zahar » avec bienveillance et l'utilise en 1973⁹² pour montrer que le programme de recherche copernicien était en progrès dès 1543, à la parution du *Des Révolutions des orbés célestes* de Copernic. En effet, si le système copernicien n'est pas plus simple que celui de Ptolémée parce qu'il demande autant, voire plus, d'épicycles, ceux-ci ne jouent pas le même rôle dans les deux systèmes. Copernic n'utilise aucun épicycle pour rendre compte des rétrogradations des planètes⁹³, parce que ce mouvement rétrograde est expliqué par le fait qu'une planète dépasse ou est dépassée par la Terre dans sa course autour du Soleil. De plus, la mesure de la durée de la rétrogradation permet de prédire la durée de la révolution complète de la planète et de mesurer ainsi sa distance au Soleil⁹⁴. Ces rétrogradations étaient connues depuis l'Antiquité, mais dans le système copernicien elles sont une conséquence de l'introduction de l'hypothèse héliocentrique. Or cette introduction et c'est ce qui est crucial pour pouvoir parler de prédiction au sens de Zahar, a été motivée par d'autres raisons : supprimer la nécessité des points équants du système ptoléméen⁹⁵.

⁹¹ « La nouveauté temporelle dans un programme de recherche est donc une condition suffisante mais non nécessaire de la nouveauté », ZAHAR, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)", p. 103.

⁹²LAKATOS, *The Methodology of scientific research programmes*. Ce texte a été publié en 1980 dans les *Philosophical Papers* de Lakatos, mais reprend une conférence prononcée en janvier 1973, au moment même où É. Zahar travaillait en collaboration avec Lakatos sur le programme de recherche d'Einstein.

⁹³Une planète rétrograde lorsqu'elle semble, vue de la Terre, reculer sur son orbite par rapport aux étoiles lointaines.

⁹⁴LAKATOS, *The Methodology of scientific research programmes*, p. 186.

⁹⁵Dans le système ptoléméen, le centre de l'orbite des planètes est un point différent du point autour duquel ces planètes ont un mouvement uniforme, appelé point équant. Voir GINGERICH et MACLACHLAN, *Nicolaus Copernicus : Making the Earth a Planet*, p. 41.

Ainsi, c'est parce que la rétrogradation des planètes n'appartenait pas à la situation problématique ayant guidé la construction de la théorie de Copernic que l'on peut considérer qu'il s'agit d'un fait nouveau prédit par cette théorie.

Cependant, si cette nouvelle définition de la nouveauté des prédictions résout certaines difficultés de la méthodologie des programmes de recherche, elle n'est pas dénuée de problèmes. Comme le fait remarquer A. Musgrave cette conception d'É. Zahar, qu'il nomme « nouveauté heuristique » (voir chapitre 1, section 1.3.1) rend « difficile de déterminer en quoi consiste une preuve qui soutient une théorie »⁹⁶. En effet, comment savoir dans quelle situation problématique a été construite une théorie ? D'après É. Zahar, c'est un travail d'historien des sciences :

Ce nouveau critère pour la nouveauté des faits implique aussi que les méthodes traditionnelles de la recherche historique sont encore plus vitales pour évaluer le soutien expérimental que ce que Lakatos avait suggéré. L'historien doit lire la correspondance privée du scientifique qu'il étudie, son objectif n'est pas de fouiller la psyché de ce scientifique, mais de démêler le raisonnement historique utilisé pour arriver à une nouvelle théorie⁹⁷.

Pour A. Musgrave, le critère d'É. Zahar va trop loin dans l'historicisation de la confirmation parce qu'il « fait de la confirmation une affaire qui dépend des personnes ». Imaginons en effet une situation dans laquelle nos deux scientifiques, Alice et Bob, déçus par la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos après avoir échoué à se mettre d'accord pour savoir si leur programme de recherche était progressif, décident d'amender cette méthodologie en utilisant la conception heuristique des prédictions développée par É. Zahar. Ils formulent tous deux la même théorie, mais alors qu'Alice la construit pour résoudre les problèmes p_1 et p_2 , Bob de son côté, qui est moins au fait de l'état de la recherche dans ce domaine, ne construit sa théorie que pour résoudre le problème p_1 . Il ne se rend compte qu'après coup que cette théorie résout aussi p_2 .

⁹⁶MUSGRAVE, "Logical versus Historical Theories of Confirmation", p. 13.

⁹⁷ZAHAR, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)", p. 103-104.

Alice et Bob sont donc confrontés à la même difficulté que lorsqu'ils employaient la méthodologie des programmes de recherche de Lakatos : la même théorie fait partie d'un programme de recherche en progrès pour Bob, alors qu'elle fait partie d'un programme de recherche en dégénérescence pour Alice. Autrement dit, même en utilisant la conception heuristique des prédictions telle qu'elle est définie par É. Zahar, on rencontre le problème de Keynes : la confirmation d'une théorie par un phénomène dépend d'éléments non logiques (la situation problématique) qui fait de cette confirmation une affaire de point de vue personnel.

A. Musgrave cherche à résoudre cette conséquence problématique de la conception heuristique en proposant une « troisième variante » dans la manière de définir la nouveauté d'un phénomène par rapport à une théorie (c'est-à-dire la prédiction d'un fait nouveau)⁹⁸ :

La théorie existante T_1 explique e_1 et e_2 mais ne peut pas expliquer e_3 . Une nouvelle théorie T_2 est proposée et e_1 et e_3 jouent un rôle heuristique dans sa construction, mais pas e_2 . [...] D'après la troisième variante e_3 confirme T_2 , alors que pour Zahar ce n'est pas le cas. Et d'après la troisième variante, e_2 ne confirme pas T_2 , tandis que c'est le cas d'après Zahar⁹⁹.

La définition que propose A. Musgrave est donc la suivante : une théorie prédit un fait si sa théorie concurrente ne peut pas l'expliquer. Si l'on adopte cette conception, la confirmation d'une théorie se fait donc toujours relativement à une théorie rivale. On a besoin d'avoir des connaissances d'arrière-plan sur cette théorie rivale et ses succès empiriques pour pouvoir déterminer ce qui compte comme un succès empirique de la nouvelle théorie. C'est pourquoi cette conception de la nouveauté des prédictions est connue sous le nom de « nouveauté théorique ».

Est-ce que cette conception théorique des prédictions mène la méthodologie des programmes de recherche aux mêmes difficultés que les deux

⁹⁸Étonnamment, A. Musgrave attribue cette troisième variante à Lakatos lui-même, alors qu'en 1974 celui-ci avait déjà publiquement reconnu qu'il acceptait la redéfinition d'É. Zahar.

⁹⁹MUSGRAVE, "Logical versus Historical Theories of Confirmation", p. 17.

autres variantes? Imaginons qu’Alice et Bob examinent tous les deux la théorie T_1 qui rend compte des faits e_1 , e_2 et e_3 . Mais Alice confronte T_1 à l’ancienne théorie T_2 qui explique e_1 et e_2 , tandis que Bob compare T_1 à T_3 qui explique e_1 et e_3 . Pour Alice, T_1 prédit e_3 , alors que pour Bob cette même théorie ne prédit pas e_3 mais e_2 . Sommes-nous retombés dans une forme de confirmation qui dépend des personnes? Non, parce qu’Alice et Bob peuvent très bien échanger leur connaissance d’arrière-plan (la théorie rivale qu’ils ont confrontée à T_1), obtenir les mêmes résultats et ainsi se mettre d’accord sur une chose : T_1 a plus de capacité prédictive que T_2 et T_3 . La conception théorique des prédictions permet donc bien d’utiliser un type de connaissance d’arrière plan qui résout le problème de Keynes : on peut définir ce qu’est une prédiction sans faire intervenir d’éléments qui ne concernent ni des théories, ni des preuves empiriques, ni des relations non logiques entre celles-ci, il suffit d’admettre des informations concernant d’autres théories concurrentes et leurs relations aux preuves empiriques.

Cependant, il existe une difficulté liée à la définition théorique des prédictions qui apparaît lorsqu’on cherche à comparer une théorie non pas à une de ses rivales ayant réellement existé, mais à des hypothèses alternatives non conçues. En effet, si T_1 explique mieux e_3 que T_2 , cela ne signifie pas qu’il n’existe pas une hypothèse alternative (disons T^*) qui explique elle aussi e_1 , e_2 et e_3 mais qui n’a pas encore été formulée par les scientifiques de l’époque où prend place la confirmation. En fait, on peut même être quasiment certain qu’une théorie comme T^* doit exister si l’on admet que T_1 , comme toute hypothèse scientifique, est destinée à être remplacée par une meilleure théorie dans le futur. Mais si l’on prend en compte cette alternative non conçue T^* , alors la capacité prédictive de T_1 est nulle. De même, pour toute théorie T_i il est possible qu’il existe une alternative non conçue T_i^* qui rende compte de tous les phénomènes qu’explique T_i . Il serait donc impossible de pouvoir jamais affirmer qu’une quelconque hypothèse ou théorie prédise quoi que ce soit si l’on admet de prendre en compte non seulement les théories qui ont historiquement existé mais aussi celles qui *auraient pu* exister mais qui n’ont pas été réellement proposées au moment de la confirmation. C’est

ce que l'on appelle *le problème des hypothèses alternatives non conçues* et il montre que la conception d'A. Musgrave doit se limiter à comparer une théorie avec celles qui ont réellement été en concurrence avec elle : c'est pour cela qu'il affirme qu'elle « introduit une *relativité historique* de la confirmation »¹⁰⁰.

Même si la conception théorique des prédictions semble mener à moins de difficultés que la conception heuristique, cette dernière continue pourtant d'être la conception la plus utilisée, probablement parce qu'elle est logiquement plus proche de la nouveauté temporelle et donc de notre conception « intuitive » de ce qu'est une prédiction. Cette particularité tient au fait que la nouveauté heuristique n'est qu'une forme de nouveauté temporelle contrefactuelle. Dire que le fait e n'a pas été utilisé dans la construction de T revient à formuler l'énoncé contrefactuel suivant :

Si e n'avait pas été connu lorsque T a été proposée, alors on aurait pu prédire l'existence de e à partir de T .

Ce que cherchent à capturer les différentes définitions de la nouveauté heuristique, ce sont précisément les conditions sous lesquelles on peut formuler un tel énoncé contrefactuel. C'est à ces conditions que l'on peut vérifier que l'ordre chronologique contingent des découvertes n'a pas contaminé l'ordre logique de la preuve, comme l'avait déjà fait remarquer Whewell au sujet des prédictions de faits du même genre (voir section 6.1.1).

C'est le sens de l'expérience de pensée à laquelle se livre Lakatos pour expliquer la supériorité du système copernicien : si deux astronomes polonais avaient vécu sous des cieux si ombrageux que les rétrogradations des planètes n'avaient jamais été observées, alors celui qui aurait adhéré au système ptoléméen n'aurait pas dû s'attendre à observer ce phénomène, tandis que celui qui aurait préféré le système copernicien aurait pu prédire l'existence de ce phénomène avant de l'avoir observé.

En conclusion, le problème posé par les cas historiques étudiés par Lakatos et ses disciples É. Zahar et A. Musgrave est le suivant : comment

¹⁰⁰Ce problème des alternatives non conçues et la relativité historique de la confirmation qui en découle sont cruciaux dans le développement d'une théorie de la confirmation pouvant résoudre le problème des données déjà connues : voir section qui suit et annexe du chapitre 6.

rendre compte du fait que des données déjà connues puissent servir de preuve en faveur d'une théorie tout en évitant le problème de Peirce? C'est cette question qui a mené à la formulation de nouvelles définitions des prédictions. Ce problème est devenu l'un des sujets les plus discutés en théorie de la confirmation lorsqu'il fut montré, au début des années 1980, qu'il touche aussi la conception de la confirmation la plus répandue aujourd'hui : les théories bayésiennes de la confirmation.

6.4.2 Le problème des preuves déjà connues dans les théories bayésiennes de la confirmation

Le projet de formaliser la relation de confirmation à l'aide du calcul de probabilités qui remonte au moins aux travaux de Keynes et de Carnap, a connu de nombreuses transformations. Cependant, à partir de la fin des années 1960, une série de théories se sont constituées autour d'un noyau commun de propositions :

- Plutôt que de définir la probabilité d'une proposition comme la fréquence relative de l'événement auquel elle réfère dans une série d'épreuves, (interprétation dite *objective* des probabilités), ces théories la définissent comme le degré de croyance rationnel d'un individu en cette proposition (interprétation dite *subjective* des probabilités).
- Plutôt que de définir la confirmation d'une hypothèse comme une probabilité seuil s au-delà de laquelle une hypothèse est confirmée ($p(h) > s$), ces théories la définissent comme une augmentation de la probabilité conditionnelle¹⁰¹ d'une hypothèse si l'on prend en compte une preuve :

$$p(h|e) > p(h)$$

- Elles admettent les probabilités conditionnelles telles que $p(h|e)$ et

¹⁰¹La probabilité conditionnelle $p(a|b)$ est la probabilité de croire en l'énoncé a si l'on croit en l'énoncé b . Elle est définie ainsi : $p(a|b) = \frac{a \wedge b}{b}$. Dans le contexte de la confirmation, on appelle aussi cette probabilité $p(a|b)$ la « probabilité *a posteriori* de a » et $p(a)$ la « probabilité *a priori* de a ».

mesurent la probabilité inverse $p(e|h)$ avec le théorème de Bayes :

$$p(h|e) = \frac{p(e|h)p(h)}{p(e)}$$

Les théories fondées sur ces trois caractéristiques sont appelées des théories « bayésiennes » de la confirmation. On n'aborde pas ici les intenses débats sur l'interprétation subjectiviste des probabilités ni toutes les variations qui séparent les différentes versions des théories bayésiennes parce que ce noyau commun de propriétés est suffisant pour exposer le problème des preuves déjà connues.

En ce qui concerne le prédictivisme, la conception bayésienne a l'avantage de prouver simplement et naturellement qu'une prédiction d'un phénomène étonnant confirme bien plus une hypothèse que la dérivation d'un phénomène peu surprenant.

En effet, si e est un phénomène dont la probabilité *a priori* $p(e)$ est proche de zéro mais qu'il est démontrable à partir de l'hypothèse h (ce qui signifie que $p(e|h) = 1$), alors on peut aisément prouver que $p(h|e) \gg p(h)$ ¹⁰²

$$p(h|e) = \frac{p(e|h)p(h)}{p(e)}$$

$$p(h|e) = \frac{p(h)}{p(e)}$$

$$p(h|e) \gg p(h)$$

Les théories bayésiennes semblent donc offrir une démonstration simple et élégante de la thèse principale du prédictivisme : si une théorie prédit un phénomène qui n'était pas connu auparavant (et dont la probabilité *a priori* était donc proche de zéro), elle sera plus fortement confirmée que si l'on utilise des tests avec des données déjà connues. Puisque cette démonstration est une conséquence du calcul des probabilités, on résout ainsi d'un seul coup les problèmes de Mill et de Keynes : il n'y a aucun sophisme d'affirmation de l'antécédent ni aucun appel à des considérations qui ne concernent ni l'hypothèse, ni la preuve, ni leurs relations

¹⁰²Le symbole $x \gg y$ est utilisé ici pour indiquer que x est supérieur de plusieurs ordres de grandeur par rapport à y .

logiques.

Cependant, ce cadeau des théories bayésiennes de la confirmation est empoisonné : apparemment ces théories ne peuvent que verser dans un prédictivisme temporel inconditionnel impossible à défendre sérieusement. En effet, si l'on reprend l'exemple d'un phénomène démontrable à partir d'une hypothèse mais que l'on considère cette fois-ci que e décrit un phénomène déjà connu et que la probabilité d'un phénomène déjà connu vaut un, alors :

$$p(h|e) = \frac{p(e|h)p(h)}{p(e)}$$

$$p(h|e) = \frac{p(h)}{p(e)}$$

$$p(h|e) = p(h)$$

Autrement dit, d'après les théories bayésiennes de la confirmation, une donnée déjà connue ne peut pas être une preuve en faveur d'une hypothèse. Il s'agit exactement du même problème que celui soulevé par É. Zahar au sujet de la méthodologie des programmes de recherche. C'est l'ouvrage de 1980 de C. Glymour intitulé *Theory and Evidence* qui montra le premier que ce problème se posait aux théories bayésiennes de la confirmation, en utilisant le cas de la confirmation de la théorie de la relativité générale. Celle-ci permet de déduire avec précision un phénomène qui restait inexpliqué dans le cadre de la théorie de Newton : l'avancée du périhélie de Mercure. Cette démonstration a été faite en 1915 par Einstein, mais l'avancée du périhélie de Mercure était connue avec précision depuis le XIX^e siècle. L'argument de C. Glymour est le suivant : si l'on se fie aux théories bayésiennes de la confirmation pour estimer le degré de croyance rationnel en une hypothèse, on doit considérer qu'Einstein et tous les physiciens de son époque ont eu tort de considérer ce succès comme une confirmation rationnelle et légitime.

Ce problème des preuves déjà connues représente une sévère difficulté pour les théories bayésiennes de la confirmation parce qu'il découle directement de deux des principes de base qu'elles partagent toutes : la confirmation est l'augmentation de la probabilité *a posteriori* d'une hypothèse

et le théorème de Bayes. Pour y échapper, ces théories ne semblent pas avoir d'autre choix que de chercher une solution du même côté qu'É. Zahar et A. Musgrave : en redéfinissant en quoi consiste la *nouveauté* d'une donnée par rapport à une théorie, c'est-à-dire en redéfinissant la relation que l'on nomme une *prédiction* entre une donnée et une théorie.

Il est intéressant de voir que même les partisans des théories bayésiennes qui essayent de minimiser l'importance du problème des preuves déjà connues ne peuvent y échapper qu'en redéfinissant implicitement en quoi consiste une prédiction. Le cas le plus frappant est celui de Colin Howson et Peter Urbach, dont l'ouvrage *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach* a le mérite de présenter non seulement un exposé complet de l'approche bayésienne de la confirmation mais aussi d'essayer d'appliquer celle-ci à des cas concrets issus de l'histoire des sciences et de l'activité scientifique contemporaine. Dans le dernier chapitre de leur ouvrage, ces auteurs consacrent une section au problème des preuves déjà connues en considérant qu'il « ne mérite pas de discussion sérieuse »¹⁰³.

Ils commencent par faire remarquer que le prédicat « être une preuve de » « désigne une *relation à trois arguments* entre les données, l'hypothèse en question et un ensemble k d'information d'arrière-plan »¹⁰⁴ et décrivent ainsi le problème des preuves déjà connues :

Le problème des preuves déjà connues ne fait que nous rappeler que si la preuve e fait partie de k , elle devrait en être effacée avant d'affirmer qu'elle a un pouvoir de confirmation¹⁰⁵.

Cette approche du problème montre que C. Howson et P. Urbach adoptent implicitement une définition *heuristique* de la nouveauté, puisque leur proposition consiste à évaluer e comme une preuve indépendante des informations d'arrière-plan déjà utilisées pour fixer la probabilité *a priori* de l'hypothèse $p(h)$.

Mais plus loin, dans l'exposé mathématique qu'ils proposent pour traiter le cas de la confirmation de la relativité générale par l'avancée

¹⁰³Colin HOWSON et Peter URBACH, *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, 3^e éd., Chicago, Open Court, 2006, p. 297.

¹⁰⁴HOWSON et URBACH, *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, p. 299.

¹⁰⁵HOWSON et URBACH, *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, p. 299.

du périhélie de Mercure, ils adoptent une définition *théorique* de la nouveauté comparable à celle d'A. Musgrave. Ils considèrent en effet que la seule théorie rivale h' de la relativité générale en 1915 était la théorie newtonienne. Puisque cette théorie n'expliquait pas complètement l'avancée du périhélie de Mercure, ils en concluent que $p(e|h') = \epsilon$, avec ϵ très proche de zéro. C'est cette supposition qui leur permet de conclure que l'avancée du périhélie de Mercure confirme énormément la théorie de la relativité générale¹⁰⁶.

Ainsi, seule la redéfinition implicite de ce qui compte comme un nouveau fait et une prédiction permet à C. Howson et P. Urbach de considérer le problème des preuves déjà connues comme un pseudo-problème. De plus, en n'explicitant pas leur choix de définir une conception *théorique* des prédictions, ils tombent dans le problème des alternatives non conçues que l'on a décrit dans la section précédente : on ne peut pas évaluer définitivement la probabilité d'une théorie, on ne peut le faire que relativement à d'autres théories, or on ne connaît ni toutes les théories possibles, ni même toutes les théories à naître¹⁰⁷.

La question des différentes conceptions de la nouveauté et de leurs caractéristiques est donc tout aussi cruciale pour les théories bayésiennes de la confirmation qu'elle l'est pour la méthodologie des programmes de recherche ou la théorie de la réfutation. Avec le problème des preuves déjà connues, ce sont toutes les conceptions du choix des hypothèses actuellement sur le marché qui doivent régler la question de savoir quelles formes de prédiction jouent un rôle dans la justification des théories.

6.5 Conclusion du chapitre

L'histoire du débat sur le prédictivisme montre que la question centrale de ce débat s'est progressivement déplacée, passant de savoir si les prédictions jouent un rôle important dans la confirmation des hypothèses à la question de savoir quelles prédictions jouent un rôle dans la confirmation des hypothèses et quel est ce rôle. C'est ce problème qui est traité

¹⁰⁶Voir l'annexe du chapitre 6 pour l'exposé de la preuve mathématique de C. Howson et P. Urbach et de ses limites.

¹⁰⁷Voir l'annexe du chapitre 6.

dans le chapitre suivant.

Avec le problème des preuves déjà connues, le débat sur le prédictivisme s'est aussi en partie désolidarisé du problème de l'induction. De la controverse entre Whewell et Mill jusque dans les années 1970, les positions des philosophes concernant les prédictions étaient fortement liées à leur conception de l'activité scientifique et de la place qu'y occupe l'induction. Mais depuis les années 1970-1980, même si la question de l'induction n'a pas disparu du débat sur le prédictivisme, celle-ci n'est plus centrale, parce qu'elle a été remplacée par celle de la nouveauté d'un phénomène par rapport à une hypothèse ou une théorie.

Les avantages du prédictivisme qui ont été mis en avant dans ce débat sont en grande partie *heuristiques*, en ce sens qu'exiger qu'une hypothèse ait des succès prédictifs à son actif permet de s'assurer qu'elle est un guide efficace dans la recherche de nouvelles découvertes et de nouvelles connaissances :

- Comme le font remarquer Comte et Mill (voir section 6.1.3), une hypothèse dont on peut tirer des prédictions permet d'anticiper sur l'expérience et ainsi de réaliser des expérimentations complexes qui testent et corrigent une hypothèse de travail.
- Comme le fait remarquer Whewell (voir section 6.1.2), exiger qu'une hypothèse soit capable de prédire des phénomènes est un garde-fou contre le biais de confirmation consistant à ne tester une hypothèse que face à des données déjà connues et sélectionnées pour la confirmer.
- Comme le fait remarquer Whewell (voir section 6.1.2) mais aussi Lakatos (voir section 6.3.2), une hypothèse ou une théorie qui permet de prédire des faits de genre différent conserve plus de simplicité dans ses développements qu'une hypothèse qui a recours à des hypothèses *ad hoc* pour être appliquée à de nouveaux ordres de phénomènes.
- Enfin, le principal avantage des hypothèses ayant des succès prédictifs à leur actif est d'éviter le *problème de Peirce* (section 6.1.3) :

il est toujours possible d'ajuster une hypothèse pour qu'elle rende compte d'un ensemble de données déjà connues, sans pour autant que cette hypothèse puisse s'appliquer à d'autres données du même genre.

À ces avantages on peut opposer une série de problèmes de nature logique :

- *Le problème de Mill* : s'il est impossible d'affirmer qu'une hypothèse est vraie parce qu'on en déduit une conséquence vraie, peut-on affirmer qu'une prédiction a un rôle *logique* et pas seulement *psychologique* dans la confirmation d'une hypothèse en dehors des cas où aucune hypothèse alternative n'a cette conséquence (voir section 6.1.3) ?
- *Le problème de Keynes* : peut-on définir une relation de prédiction entre une donnée et une hypothèse qui soit pertinente pour la confirmation de celle-ci si la confirmation ne doit faire intervenir que des informations sur cette hypothèse, cette donnée et sur les relations logiques qu'elles entretiennent (voir section 6.2.1) ?
- *Le problème de Duhem* : si une prédiction ne se tire jamais d'une hypothèse isolée mais d'un ensemble d'hypothèses conjointes, comment savoir quelle hypothèse est confirmée par un succès prédictif ou réfutée par un échec prédictif (voir section 6.3.1) ?
- *Le problème des preuves déjà connues* : aucun prédictivisme temporel inconditionnel n'est cohérent avec l'histoire des sciences et l'activité scientifique concrète parce que les données déjà connues ont joué et peuvent jouer le rôle de preuve d'une hypothèse.

Pour résoudre ces problèmes, différentes solutions ont été proposées, qui consistent toutes à introduire, dans la relation de confirmation, différents types de connaissances d'arrière-plan (rendues nécessaires par la nouvelle énigme de l'induction, voir section 6.2.2) :

- *La théorie de la projection de Goodman* : pour évaluer le statut d'une hypothèse, on doit prendre en compte les succès prédictifs qu'elle a déjà engrangés (voir section 6.2.2).

- *La définition heuristique de la nouveauté par É. Zahar* : pour évaluer une hypothèse, on doit prendre en compte les données utilisées dans sa formulation (voir section 6.4.1).
- *La définition théorique de la nouveauté par A. Musgrave* : pour évaluer une hypothèse, on doit prendre en compte les succès des hypothèses rivales (voir section 6.4.1).

Ainsi, tenter de définir un prédictivisme cohérent consiste à essayer d'utiliser ces différents types de connaissance d'arrière-plan pour conserver les bénéfices heuristiques d'une théorie prédictiviste de la confirmation tout en évitant ses difficultés logiques. C'est à une telle tentative qu'est consacré le chapitre suivant.

Chapitre 7

Le rôle de la capacité prédictive dans la confirmation des hypothèses

Le présent chapitre examine ces deux questions : quelles prédictions ont un rôle déterminant dans la confirmation d'une théorie et quel est ce rôle ? Autrement dit : y a-t-il de bons arguments pour soutenir une position prédictiviste ? À quel type de prédictivisme ces arguments aboutissent-ils ?

Ces questions sont cruciales pour accomplir l'objectif final de cette thèse : évaluer la portée des succès prédictifs et notamment savoir si l'on ne se fourvoie pas en leur donnant une place centrale dans la justification de nouvelles hypothèses ou théories.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que de nombreuses formes de prédictivisme ont été développées depuis le XIX^e siècle et le débat opposant Whewell à Mill sur ces questions. Ce chapitre a pour objectif de distinguer ces différentes formes de prédictivisme et d'examiner s'il en existe une qui soit cohérente, qui reflète l'activité scientifique réelle et rationnelle.

Dans la première section, je montre que le prédictivisme temporel et le prédictivisme inconditionnel ne sont soutenus par aucun argument convaincant.

Dans la deuxième section, je montre que les meilleurs arguments en

faveur du prédictivisme analysés dans le chapitre précédent ont été reformulés récemment et amènent à une thèse qui est actuellement dominante dans le débat sur les rapports entre prédictions et confirmation : le prédictivisme heuristique *conditionnel* et *faible*. Dans la troisième section, je discute les limites de cette position dominante.

Dans la quatrième et dernière section, je montre que cette position dominante peut être améliorée en analysant les notions de fécondité et de capacité prédictive et je montre, à partir de deux cas concrets issus de l'histoire des sciences et de l'activité scientifique contemporaine, que cette analyse est nécessaire pour distinguer les succès et les échecs prédictifs.

7.1 Deux positions intenable : le prédictivisme temporel et le prédictivisme inconditionnel

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le problème des preuves déjà connues disqualifie le prédictivisme temporel et inconditionnel, c'est-à-dire que l'on ne peut pas soutenir que seules les prédictions de phénomènes futurs ou inconnus peuvent confirmer une hypothèse, un modèle ou une théorie.

Cependant, on pourrait penser qu'il est possible de dissocier le prédictivisme temporel et inconditionnel. Il semble au premier abord possible de définir un prédictivisme temporel mais conditionnel d'une part — qui consisterait à affirmer que les prédictions de phénomènes inconnus peuvent, dans certains contextes, compter plus que les autres formes de confirmation — et un prédictivisme inconditionnel non temporel d'autre part — soutenant que les prédictions comptent *toujours* plus que les autres tests de confirmation si l'on admet que les prédictions ne concernent pas seulement les phénomènes futurs ou inconnus.

Dans cette section, je soutiens que même si l'on dissocie prédictivisme temporel et prédictivisme inconditionnel, ces deux positions restent intenable.

7.1.1 Retour sur le prédictivisme temporel

Le prédictivisme temporel semble être une position pour le moins inconfortable parce que l'histoire des sciences regorge de cas où des hypothèses ont été confirmées par des données déjà connues. Mais il reste possible de considérer que, *dans certains contextes particuliers*, les phénomènes prédits pèsent plus que les phénomènes déjà connus dans l'évaluation d'une hypothèse. C'est cette thèse que soutint Patrick Maher en 1988 dans un article intitulé « Prediction, Accommodation, and the Logic of Discovery »¹, dont l'argument central a relancé le débat sur les mérites respectifs des faits prédits et des faits déjà connus.

Cet argument de P. Maher consiste en une expérience de pensée : on effectue 99 lancers de pièce et on demande ensuite à deux chercheuses de prédire le résultat du 100^e lancer. La première a prédit le résultat des 100 lancers *avant* qu'ils ne soient effectués et sa prédiction a été couronnée de succès pour les 99 premiers lancers. La seconde formule sa prédiction sur le 100^e lancer *après* avoir observé le résultat des 99 premiers lancers.

Imaginons que les prédictions concernant le 100^e lancer divergent : l'une des chercheuses affirme que le résultat sera pile, l'autre face. Si l'on demande alors à une tierce personne de parier sur le résultat du 100^e lancer, il semble aller de soi qu'elle ferait plus confiance à la première chercheuse, celle qui a prédit les 99 premiers lancers (avec succès), qu'à la seconde, qui n'a prédit que le 100^e lancer.

En effet, si l'observation des lancers ne permettent pas de rejeter l'hypothèse que les lancers sont indépendants, alors la seconde chercheuse semble faire sa prédiction au hasard et elle n'a qu'une chance sur deux que sa prédiction s'avère correcte. En revanche, la première chercheuse, qui a réussi à prédire 99 lancers jusqu'ici, semble disposer « d'une méthode fiable pour prédire avec succès les lancers de pièce »². Intuitivement, on attribuerait donc à sa prédiction une probabilité supérieure à un demi (voire proche de 1) de s'avérer correcte.

Pourtant, imaginons que les deux chercheuses aient fait la même hy-

¹Patrick MAHER, "Prediction, Accommodation, and the Logic of Discovery", *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988), p. 273–285.

²MAHER, "Prediction, Accommodation, and the Logic of Discovery", p. 275.

pothèse h concernant le 100^e lancer (par exemple, h : la pièce tombera sur pile). Dans les deux cas, on a affaire à une prédiction qui est soutenue par les mêmes preuves e — les 99 premiers résultats. Comment expliquer que h semble plus fiable si c’est la première chercheuse qui la propose que si c’est la seconde ? La seule différence entre les deux est le moment où elles ont formulé h : la première chercheuse *avant* les 99 premiers lancers, la seconde après. Cela semble indiquer que *l’ordre temporel* entre une hypothèse et les preuves qui la soutiennent est capable d’augmenter ou de diminuer la confiance que l’on a en cette hypothèse. Apparemment, quand une hypothèse est proposée *avant* des données et qu’elle est confirmée par ces données, on a plus confiance en elle que si elle est proposée *après* : elle est donc mieux confirmée par des données prédites. D’après P. Maher cette expérience de pensée illustre et justifie la prédilection des scientifiques pour les prédictions temporelles, comme celle des membres du jury de la *Royal Society* qui attribuèrent à la médaille Davy à Mendeleïev en 1882.

Comme toutes les expériences de pensée reposant sur une intuition psychologique, celle de P. Maher peut être soumise à diverses variations qui renforcent ou, au contraire, font disparaître cette intuition. Un long débat a ainsi suivi son article, qui s’est poursuivi jusqu’à nos jours, explorant quasiment toutes les variations possibles de l’expérience de pensée des lancers de pièce³.

Malgré l’intérêt intrinsèque de ce débat, je ne l’exposerai pas ici en détail, parce qu’il n’a pas sa place dans une thèse consacrée aux prédictions *scientifiques*. En effet, les prédictions que réalisent les deux chercheuses dans l’expérience de pensée de P. Maher *ne sont pas des prédictions scientifiques* et on ne peut en aucun cas rapprocher cette expérience de pensée

³Voir, entre autres : Colin HOWSON et Allan FRANKLIN, “Maher, Mendeleev and Bayesianism”, *Philosophy of Science* 58.4 (1991), p. 574–585 ; Patrick MAHER, “Howson and Franklin on Prediction”, *Philosophy of Science* 60.2 (1993), p. 329–340 ; Eric BARNES, “Social Predictivism”, *Erkenntnis* 45.1 (1996), p. 69–89 ; Marc LANGE, “The Apparent Superiority of Prediction to Accommodation as a Side Effect : a Reply to Maher”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 52.3 (2001), p. 575–588 ; David HARKER, “Accommodation and Prediction : The Case of the Persistent Head”, *British Journal for the Philosophy of Science* 57.2 (2006), p. 309–321 ; John WORRALL, “Prediction and accommodation revisited”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 45 (2014), p. 54–61.

d'un contexte scientifique un tant soit peu concret.

Dans l'introduction de cette thèse, on a vu que ce qui distingue une prédiction scientifique d'une divination ou d'une prophétie, c'est que le raisonnement prédictif dont la prédiction scientifique est la conclusion est un processus public, transparent et répétable. Si une équipe de chercheuses prétend avoir réussi à prédire cinq, dix ou cent séismes par exemple et décide de publier un article dans une revue scientifique pour faire connaître son succès, son manuscrit ne sera pas accepté tant qu'elle ne fournira pas la méthode qui lui a permis de réaliser cet exploit, parce que c'est à cette seule condition que ses pairs pourront juger de la fiabilité et de la répétabilité de ses résultats.

Or c'est précisément ce que nous refuse l'expérience de pensée des lancers de pièce : aucune information n'est disponible sur les détails des méthodes que chaque chercheuse utilise pour parvenir à sa prédiction du 100^e lancer. Cette expérience ne peut donc pas représenter l'activité scientifique contrairement à ce que soutient P. Maher⁴.

Si l'on se place dans un authentique contexte scientifique et que l'on est en droit de demander à chacune des deux scientifiques le raisonnement qui l'a amenée à prédire le 100^e lancer, alors l'expérience de pensée de P. Maher peut aboutir à une autre conclusion. En effet, si l'on avait accès à ces raisonnements, alors de deux choses l'une. Soit les chercheuses font toutes deux l'hypothèse que les lancers sont aléatoires et indépendants : il n'y a alors aucune raison de préférer la prédiction de l'une d'entre elles, puisque la probabilité que la pièce tombe sur pile ou face lors du 100^e lancer est de $1/2$ quoi qu'il arrive. Soit les chercheuses font l'hypothèse que la séquence de la séquence de lancers n'est pas réellement une suite d'épreuves aléatoires indépendantes⁵. Mais alors, ne serait-on pas

⁴Comme le fait judicieusement remarquer Eric Barnes, si l'on ne sait rien de la méthode employée par les chercheuses et si l'on imagine qu'il n'y a pas qu'une mais plusieurs centaines de *milliers* de personnes ayant toutes essayé de prédire les 100 lancers, alors le fait de réussir à prédire les 99 premiers lancers n'apparaît plus comme un succès. La chercheuse ayant réussi cette prédiction ressemble plus alors à un heureux gagnant d'une loterie qu'à une scientifique et la confiance en sa 100^e et dernière prédiction tombe à un demi, comme pour sa rivale. Voir BARNES, "Social Predictivism", p. 71.

⁵C'est la situation qu'imaginent aussi bien Marc Lange que David Harker pour critiquer l'expérience de pensée de P. Maher : soit une alternance de pile et de face

plus enclin à se fier à la prédiction de la deuxième chercheuse, qui attend 99 lancers pour prédire le 100^e? En effet, l’observation des 99 premiers lancers peut donner des raisons qui justifient l’hypothèse selon laquelle les lancers ne sont pas une suite d’épreuves aléatoires indépendantes, alors que la première chercheuse n’a pas de raisons *a priori* de faire cette hypothèse. En outre, les 99 premiers résultats doivent montrer certaines régularités si les lancers ne sont pas indépendants. Dans ce cas, une méthode d’analyse statistique de ces résultats est une méthode efficace pour prédire le résultat du 100^e lancer. La première chercheuse n’ayant pas pu réaliser cette analyse puisqu’elle a prédit le résultat des 100 lancers d’un seul coup, on ferait alors plus confiance à la deuxième chercheuse qui a attendu de voir les résultats des 99 premiers lancers pour les analyser.

Ainsi, l’argument de P. Maher en faveur du prédictivisme temporel semble indiquer seulement que lorsqu’on est incapable d’avoir accès aux détails du raisonnement prédictif produisant une prédiction, on est enclin à préférer les prédictions qui ont lieu *avant* la découverte qui les confirment ou les infirment. Mais il ne prouve pas que cette situation soit typique des prédictions scientifiques, puisque ces prédictions sont normalement accompagnées des méthodes et hypothèses qui permettent de les réaliser⁶.

(LANGE, “The Apparent Superiority of Prediction to Accommodation as a Side Effect : a Reply to Maher”), soit une suite de face (HARKER, “Accommodation and Prediction : The Case of the Persistent Head”).

⁶Cela ne signifie pas que l’argument des lancers de pièce soit dénué d’intérêt : il met en lumière la raison pour laquelle les prédictions temporelles ont autant d’importance dans des contextes *non-scientifiques* de confirmation, par exemple lorsqu’il s’agit de présenter une nouvelle théorie à un public non-expert, comme des étudiants, des politiciens, des amateurs éclairés, des scientifiques d’autres disciplines, etc. Contrairement à ce que pensait Mill, ce public n’est pas composé uniquement d’ignorants prompts à l’admiration béate : mais en l’absence d’un savoir spécialisé permettant de comprendre et d’évaluer la méthode et les hypothèses permettant de réaliser une prédiction, il est nécessaire d’évaluer la fiabilité de cette méthode et de ces hypothèses par d’autres moyens. Les prédictions temporelles réussies sont un moyen rationnel et efficace, mais qui a ses faux-fuyants, de procéder à cette évaluation non-experte.

7.1.2 Le cas Mendeleïev et la redéfinition des prédictions heuristiques

On peut généraliser cette objection faite à P. Maher à tout argument en faveur du prédictivisme temporel. Dans le contexte de la confirmation d'une théorie ou d'une hypothèse, si l'on réalise une prédiction scientifique, alors cette prédiction doit s'accompagner d'un raisonnement prédictif, c'est-à-dire d'une série d'inférences ayant pour résultat de fixer la valeur de certaines variables. La mesure de la valeur prédite de ces variables constitue ensuite le test de la prédiction. Si celle-ci est considérée comme réussie, alors on doit se pencher sur ce raisonnement prédictif pour vérifier que ce succès n'est pas qu'une supposition chanceuse, mais peut être porté au crédit de cette hypothèse. Ce que l'on examine donc, lorsqu'on teste une prédiction pour confirmer une hypothèse, ce n'est pas seulement si le phénomène prédit a bien été observé, mais aussi et surtout les rapports entre cette hypothèse et le phénomène, pour savoir si celui-ci peut être considéré comme une preuve.

Cette critique du prédictivisme temporel fut développée par J. Worrall et l'historien spécialiste des travaux de Mendeleïev Eric Scerri, qui ont analysé les prédictions de Mendeleïev pour montrer qu'elles n'avaient pas eu l'importance que leur a prêtée P. Maher⁷. En se fondant sur les documents disponibles concernant la réception des travaux de Mendeleïev, notamment le rapport du jury de la médaille Davy, E. Scerri et J. Worrall font ainsi remarquer que le prix ne fut pas décerné qu'au seul Mendeleïev mais aussi au chimiste allemand Lothar Meyer (1830-1895), qui avait proposé une classification similaire à celle de Mendeleïev mais n'avait formulé aucune prédiction d'éléments inconnus⁸.

De plus, un grand nombre des prédictions réalisées par Mendeleïev se sont révélées fausses, comme l'existence d'un élément plus léger que l'hydrogène présent uniquement dans l'atmosphère solaire (le *Coronium* ou *Newtonium*)⁹.

⁷Eric SCERRI et John WORRALL, "Prediction and the Periodic Table", *Studies in History and Philosophy of Science* 32.3 (2001), p. 407-452.

⁸SCERRI et WORRALL, "Prediction and the Periodic Table", p. 416.

⁹D'après E. Scerri et J. Worrall, la *majorité* des prédictions de Mendeleïev étaient fausses : voir SCERRI et WORRALL, "Prediction and the Periodic Table", p. 419.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE

nombre atomique
 électrons par orbitale
 symbole
 nom
 masse atomique relative

électronégativité
 électrons par couche

élément métallique
 élément non-métallique
 élément à prédominance métallique
 élément à prédominance non métallique
 gaz rare

1a		2a		CLASSIFICATION PÉRIODIQUE										3a	4a	5a	6a	7a	0																																												
1	H	2	He											3	B	4	C	5	N	6	O	7	F	8	Ne																																						
3	Li	4	Be											11	Na	12	Mg											19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
11	Na	12	Mg											37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe														
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr																												
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe																												
55	Cs	56	Ba	57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu																														
87	Fr	88	Ra	89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr																														

FIGURE 7.1 : La classification périodique de Mendeleïev. Les éléments sont rangés dans l'ordre de leur numéro atomique.

Dans la quatrième ligne du tableau on trouve le Gallium (Ga) et le Germanium (Ge) dont l'existence et le poids furent prédits par Mendeleïev en faisant la moyenne des masses atomiques des éléments les encadrant.

Au dessus de chaque colonne est indiqué le nombre d'électrons de valence des éléments de cette colonne. La dernière colonne, les gaz rares, n'ont aucun électron de valence et ne forment pas de composés, ce qui explique leur découverte tardive.

Enfin, ce qui a compté principalement dans l'acceptation de la table de Mendeleïev est moins la prédiction temporellement nouvelle d'éléments inconnus que sa capacité à s'ajuster à la découverte d'une nouvelle famille de gaz : les gaz nobles, des gaz monoatomiques comme l'Hélium, le Néon ou l'Argon. La masse atomique de l'Argon fut mesurée pour la première fois en 1895 et celle de l'Hélium peu de temps après. À la fin du XIX^e, ces gaz ne semblaient pas avoir de place disponible dans la classification périodique des éléments et Mendeleïev rajouta une colonne à son tableau pour l'ajuster à ces nouvelles découvertes (voir figure 7.1). Étonnamment (pour un prédictiviste temporel), cet ajustement ne fut pas pris par les chimistes de l'époque comme une manière *ad hoc* de sauver la classification périodique, mais au contraire comme un « test crucial »¹⁰ la confirmant fortement.

Pour J. Worrall, cette étude historique montre non seulement que le succès de la théorie de Mendeleïev n'illustre pas le prédictivisme temporel, mais aussi et surtout que la différence entre une théorie qui *prédit* un fait et une théorie qui est *ajustée* à un fait est plus subtile qu'il n'y paraît au premier abord.

Pour utiliser la loi périodique de Mendeleïev il faut d'abord mesurer la masse atomique de l'hydrogène, parce que les masses atomiques des autres éléments sont des multiples de la masse atomique de l'hydrogène. On spécifie ainsi la version générale de la théorie de Mendeleïev. Si l'on considère que la version générale d'une théorie T est composée de formules qui comportent des paramètres libres $\alpha_1, \dots, \alpha_n$, cela signifie qu'il faut fixer un ou plusieurs de ces paramètres libres pour transformer T en une version spécifique T' afin de pouvoir l'appliquer à un phénomène e . Si l'on n'utilise pas e pour fixer ces paramètres libres (mais uniquement des hypothèses auxiliaires et d'autres phénomènes), alors e est prédit par T et donc confirme T . Si l'on utilise des informations sur le phénomène e pour fixer ces paramètres, alors on ne peut pas dire que e est prédit par T et c'est uniquement T' , la version spécifique de T qui est confirmée. En revanche, T en tant que telle n'est pas confirmée, puisque T' ne peut

¹⁰SCERRI et WORRALL, "Prediction and the Periodic Table", p. 445.

être ajustée à e que si l'on accepte déjà T ¹¹. Dans le cas de l'ajout du groupe des gaz nobles à la classification de Mendeleïev, pour J. Worrall il s'agit bien d'une nouvelle prédiction et non d'un ajustement *ad hoc*, parce que cet ajout ne nécessitait pas de modifier la loi au fondement de la classification (tous les éléments sont classés en fonction de leur masse atomique) et conservait la principale propriété de la classification (tous les éléments d'une même colonne ont la même valence). On aurait donc pu prédire que l'Hélium et l'Argon avaient la même valence à partir de leurs masses atomiques sans modifier la loi de Mendeleïev. L'ajout de la colonne des gaz nobles confirma donc la classification périodique toute entière en confirmant la loi sur laquelle elle est fondée¹².

Implicitement, pour analyser le cas des prédictions de Mendeleïev, J. Worrall a donc redéfini la notion de *nouveauté heuristique* (voir chapitre 6.4.1) : un phénomène e est heuristiquement nouveau par rapport à une hypothèse h si et seulement si aucune information sur e n'est utilisée dans la série d'inférence qui mène de h à e . Autrement dit, h prédit heuristiquement e si et seulement si il existe au moins un raisonnement prédictif utilisant h et inférant e qui peut être mené à bien sans information sur e ¹³.

Cette nouvelle définition des prédictions heuristiques proposée par J. Worrall évite les écueils de la première définition proposée par É. Zahar (voir chapitre 6, section 6.4.1). Elle montre que si les prédictions temporellement nouvelles jouent un rôle dans la confirmation d'une hypothèse, ce n'est pas parce qu'il est important qu'un phénomène soit découvert après la formulation d'une hypothèse, mais uniquement parce que l'on peut être certain que ce phénomène n'a pas été utilisé pour formuler l'hypothèse. Autrement dit, les prédictions temporelles ne sont pertinentes dans le contexte de la confirmation que parce qu'elles ne sont qu'un cas particulier des prédictions heuristiques : ce sont des prédictions

¹¹WORRALL, "Prediction and accommodation revisited", p. 56.

¹²SCERRI et WORRALL, "Prediction and the Periodic Table", p. 446.

¹³L'appellation de prédiction « heuristique » n'est plus utilisée de nos jours. Mais elle a été remplacée par celle de « prédiction nouvelle dans l'utilisation » (*use-novel prediction*), appellation qui ne brille pas par son élégance et qui a la même signification. Je m'en tiens donc dans cette thèse à l'appellation de « prédiction heuristiquement nouvelle ».

de phénomènes qui n'ont pas été utilisées dans la formulation d'une hypothèse et qui ont été découverts *après* la formulation d'une hypothèse, mais cette spécificité n'est pas pertinente. La preuve, pour J. Worrall, que cette spécificité n'est pas pertinente est que souvent une prédiction heuristique peut amener, sans discontinuité, à faire une prédiction temporelle. Ce fut le cas de la prédiction heuristique des gaz nobles qui permit la découverte en 1898 d'un nouveau élément de cette catégorie : le Néon.

La théorie de la confirmation de J. Worrall consiste ainsi à définir une prédiction comme la procédure opposée à celle de l'ajustement *ad hoc*, de manière à ce que toute confirmation de la version générale d'une théorie (que Lakatos aurait appelé un programme de recherche) soit un test prédictif. Cette position est une forme de prédictivisme heuristique inconditionnel. Dans la section suivant, on montre deux contre-exemples qui disqualifient cette position.

7.1.3 Le prédictivisme heuristique inconditionnel et ses contre-exemples

Le prédictivisme inconditionnel est la position qui consiste à affirmer que *quelles que soient les conditions*, une prédiction réussie confirme mieux une hypothèse que tout autre type de test. Autrement dit, seules les prédictions sont des test authentiques, les autres formes de confirmation ne sont que des substituts qui ne sont pas à même de hisser notre confiance en une hypothèse au même niveau qu'un succès prédictif.

Si le problème des preuves déjà connues élimine la possibilité d'un prédictivisme *temporel* inconditionnel, le prédictivisme *heuristique* inconditionnel est une position représentée dans les conceptions du choix des hypothèses qui refusent toute approche inductive, dans la lignée de Popper et de Lakatos. En effet, comme on l'a vu dans les critiques de Popper adressées à Keynes (voir section 6.3.2), si l'on refuse de faire du choix des hypothèses une affaire de soutien inductif, le degré de corroboration se mesure à la capacité d'une théorie à rendre compte des faits de manière non *ad hoc*. Or si l'on adopte la conception heuristique des prédictions, celles-ci sont par définition l'ensemble des conséquences non

ad hoc d'une hypothèse ou d'une théorie. Tester les prédictions d'une hypothèse est donc la seule manière d'en obtenir une confirmation valide.

On pourrait penser que le prédictivisme inconditionnel est une position bien trop contraignante pour refléter précisément la grande diversité des méthodes utilisées par les scientifiques des différentes branches de la science moderne. Lorsqu'un astronome — comme Hubble par exemple (voir section 1.3.2) — obtient une hypothèse à partir d'un ensemble de données en faisant une régression statistique sur ces données, il semblerait étonnant de considérer que ces données ne comptent pas dans la confirmation de cette hypothèse. On imagine mal une scientifique ignorer volontairement une partie des données d'observations lorsqu'elle formule une hypothèse uniquement pour pouvoir tester cette hypothèse par la suite ! C'est pourtant ce que recommande de faire le prédictivisme inconditionnel heuristique.

Donc, si l'on admet l'existence d'autres tests d'hypothèse que les tests prédictifs, par exemple les tests de signification statistiques, alors le prédictivisme inconditionnel est une position intenable. Cependant, la plupart des tests statistiques utilisés actuellement dans les publications scientifiques semblent pouvoir être interprétés comme des tests prédictifs, ce qui apporte de l'eau au moulin du prédictivisme heuristique inconditionnel.

Prédictions et tests de signification statistique

Dans l'immense majorité des cas, les résultats expérimentaux publiés dans les revues scientifiques sont soumis à des tests statistiques qui ont pour fonction de montrer que ces résultats sont fiables et ne sont pas dus à des erreurs de mesure, des perturbations du dispositif expérimental, ou une coïncidence.

Par exemple, les membres de l'équipe ATLAS (un des instruments du LHC) annoncèrent la détection du boson de Higgs en 2012 en ces termes :

Cette observation, qui a une signification de 5,9 écarts-types, correspondant à une probabilité de fluctuation d'arrière-plan de $1,7 \cdot 10^{-9}$, est compatible avec la production et la fis-

sion du boson de Higgs du modèle standard¹⁴.

Cette formulation indique que l'observation faite par l'instrument ATLAS a été soumise à un test de *signification statistique* ayant abouti à la conclusion que la probabilité de l'hypothèse selon laquelle les mesures réalisées soient dues à un autre phénomène que la production et la fission du boson de Higgs est d'environ 1,7 chance sur un milliard.

De tels tests statistiques sont dits *fréquentistes* parce qu'ils n'utilisent ni le théorème de Bayes ni aucun autre moyen pour calculer la *probabilité inverse* d'une hypothèse, c'est-à-dire la probabilité de cette hypothèse si l'on prend en compte les données.

À la place d'un théorème bayésien pour réviser le degré de confiance en une hypothèse, les statistiques fréquentistes utilisent des *tests de signification* qui permettent de savoir quand une série d'expériences permet de *rejeter* une hypothèse, hypothèse souvent appelée *hypothèse nulle* qui désigne l'hypothèse selon laquelle un effet expérimental est observé par hasard. Les tests fréquentistes actuels ont deux origines : les travaux de Ronald Fisher (1890-1962) et ceux de Jerzy Neyman (1894-1981) et Karl Pearson (1857-1936). Malgré leurs différences notables sur de nombreux points¹⁵, ces auteurs partagent une conception du test d'hypothèse qui donnent une grande place aux prédictions.

Reprenons un des exemples de Fisher : si l'on essaie de tester l'affirmation d'une dame selon laquelle elle peut déterminer, en goûtant une tasse de thé, si le sucre a été versé après le thé ou s'il a été mis dans la tasse en premier, l'hypothèse nulle est qu'elle réponde au hasard et réussisse à déterminer si le sucre a été versé avant ou après le thé par pure chance. Si le test consiste à ne goûter qu'une seule tasse, alors la probabilité d'un choix correct sous l'hypothèse nulle est d'un demi, puisque la dame a une chance sur deux de réussir ce test sans disposer de la faculté qu'elle prétend avoir. Ce n'est donc pas un test qui a une forte signifi-

¹⁴ATLAS et al., "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", *Physics Letters B* 716.1 (2012), p. 1–29, p. 1.

¹⁵Voir Bruno LECOUTRE, "Pourquoi les méthodes bayésiennes sont-elles si peu utilisées dans les publications expérimentales?", *Le Bayésianisme aujourd'hui*, sous la dir. d'Isabelle DROUET, Éditions Matériologiques, 2016, chap. 6, p. 194–219, p. 198.

cation statistique, parce qu'aucune des observations possibles n'est très improbable si l'hypothèse nulle est vraie.

En revanche, si l'on propose à cette même dame, dans un ordre déterminé aléatoirement, huit tasses dont quatre ont été préparées en versant le sucre après le thé et quatre en versant le sucre avant le thé, alors elle n'a plus que 1 chance sur 70 de réussir par pure chance à classer les tasses en fonction de leur préparation¹⁶. La dame a moins de 5% de réussir ce test par pure chance et que le test est significatif pour un seuil de signification à 5% (ce qui correspond, dans la terminologie actuelle, à un test de valeur-p avec $p = .05$).

Un tel test de signification statistique semble être un test prédictif, puisque les hypothèses sont acceptées ou rejetées sur la base de la concordance de leurs conséquences avec des données expérimentales. Loin d'être réfuté par l'utilisation fréquente, dans la pratique scientifique courante, de tests de signification statistique, le prédictivisme inconditionnel semble pouvoir s'appuyer sur cette pratique pour prouver qu'il correspond bien à l'activité scientifique concrète. Tout le problème est de savoir si l'on peut bien considérer que les tests fréquentistes sont des tests prédictifs.

La philosophe des sciences Deborah Mayo aborde cette question dans le 9^e chapitre de son ouvrage *Error and the growth of knowledge*. La thèse générale de cet ouvrage est que les tests statistiques fréquentistes (et plus particulièrement la méthodologie de Neyman-Pearson) représentent ce que Popper avait défini comme des *tests sévères* (voir chapitre 6, section 6.3.2), c'est-à-dire des tests qui ont peu de chances d'être réussis si l'hypothèse testée est fausse et qui nous permettent d'apprendre de nos erreurs. Dans le chapitre 8 de son ouvrage, elle s'oppose à l'idée que les tests sévères sont des tests prédictifs, parce que tous les tests prédictifs ne sont pas, d'après elle, sévères et parce que les tests sévères ne reposent pas tous sur des prédictions. C'est pourquoi elle aborde dans le chapitre 9 la question qui nous intéresse ici : peut-on dire que les tests de signification sont des tests prédictifs ?

Comme elle le fait remarquer, « le débat sur la nouveauté des preuves

¹⁶Ronald FISHER, *The Design of experiments*, 8, 1971, New York, Hafner Publishing Company, 1935, p. 12.

en philosophie des sciences est parallèle à un débat méthodologique actuel dans la pratique scientifique réelle »¹⁷. En effet, très souvent, la méthodologie des tests fréquentistes inclut le principe suivant (énoncé par Egon Pearson, le fils de Karl Pearson) : « baser le choix du test d'une hypothèse statistique sur des observations est une pratique dangereuse parce qu'une étude de la configuration d'un échantillon révélera sûrement certains traits qui sont exceptionnels si l'hypothèse est vraie »¹⁸. Ce principe recommande de ne pas formuler d'hypothèse à partir de l'échantillon de données qui doit ensuite servir de test à cette hypothèse et donc de n'utiliser que des prédictions heuristiques pour tester une hypothèse.

L'objectif de ce principe est d'empêcher une erreur qui consiste à rassembler un grand nombre de données, puis de chercher des corrélations significatives sur ces données. Imaginons par exemple que l'on étudie le comportement d'un grand nombre d'enfants âgés de 5 à 10 ans en relevant de nombreux traits de leur comportement : leurs jeux, leurs habitudes alimentaires, leurs résultats scolaires, leurs relations sociales avec les adultes et les autres enfants, etc. Même si ces variables sont indépendantes les unes des autres, il serait très peu probable que dans l'échantillon récolté n'apparaisse *aucune* corrélation, par exemple entre le fait de jouer au Monopoly et de manger des brocolis¹⁹.

Par conséquent, si l'on formule les hypothèses à tester après avoir fait une analyse statistique de cet échantillon — une procédure que D. Mayo appelle « la chasse au fusil à pompe »²⁰ — alors on risque d'obtenir des hypothèses qui peuvent passer un test de signification statistique mais qui ne sont pas pour autant représentatives de corrélations *réelles*, au sens où on les retrouverait dans d'autres échantillons d'enfants :

Autrement dit, la procédure de chasse au fusil à pompe à cet

¹⁷Deborah MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, Chicago, Chicago University Press, 1996, p. 294.

¹⁸Cité par MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 294

¹⁹On peut prouver qu'il y a même 64% de chance de trouver au moins une corrélation significative à 5% dans un ensemble de variables indépendantes si l'on examine les relations entre vingt de ces variables. Il suffit de considérer que chaque test de corrélation est une épreuve indépendante et d'appliquer la loi binomiale : $1 - (0.95)^{20} = 1 - 0.36 = 0.64$.

²⁰MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 300.

inconvéniement majeur : elle trouve des corrélations statistiquement significatives là où il n'y en a aucune²¹.

On reconnaît ici un argument très similaire à celui de Peirce en faveur de la prédésignation des hypothèses, selon lequel il est nécessaire de formuler les hypothèses *indépendamment* de l'échantillon qui sert à les tester, au risque de faire un *ajustement forcé* de ces hypothèses, c'est-à-dire précisément de les ajuster aux particularités singulières d'un échantillon plutôt qu'à des relations qui existent dans la population dont est issu cet échantillon (voir chapitre 6, section 6.1.3). La chasse au fusil à pompe n'est que la manière de procéder à un ajustement forcé pour des hypothèses statistiques évaluées par des tests fréquentistes.

Ainsi, les tests de signification statistique d'hypothèse prendraient la forme de prédictions heuristiques pour éviter l'ajustement forcé de leurs hypothèses. Mais comme on le montre dans la section suivante, les arguments *à la Peirce* ne peuvent jamais mener à un prédictivisme inconditionnel. Peirce lui-même adhérerait à un prédictivisme conditionnel, puisqu'il considérerait que dans certaines conditions il n'est pas nécessaire de prédésigner les hypothèses : il suffit de vérifier la « simplicité » de ces hypothèses (voir chapitre 6, section 6.1.3). D. Mayo, qui cite et s'inspire de Peirce²², montre que ces conditions ont leur correspondant dans l'analyse statistique fréquentiste : on peut formuler une hypothèse à partir de données qui servent à les tester si « l'on spécifie le test (le nombre de variables étudiées, la taille de l'échantillon, le degré de signification requis) »²³.

En conclusion, les tests statistiques ne sont pas *essentiellement* prédictifs : ils ne le sont que pour éviter les risques d'ajustement forcé d'une hypothèse à des données. Comme le remarque D. Mayo²⁴, il existe des méthodes pour éviter l'ajustement forcé (on en donne un exemple dans la section suivante) qui permettent de tester des hypothèses sur le même ensemble de données que celui qui a servi à les ajuster. Autrement dit, si elle était bien encadrée, la chasse au fusil à pompe ne devrait pas être

²¹MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 307.

²²Voir MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 314

²³MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 312.

²⁴MAYO, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, p. 318.

interdite et il n'y a pas de raison de considérer que les tests sévères sont tous prédictifs.

Les tests de cohérence d'hypothèse

La dernière erreur de toute position qui se réclame du prédictivisme inconditionnel est d'oublier les tests hypothèses qui ne sont pas empiriques, c'est-à-dire qui ne consistent pas en une comparaison entre des résultats théoriques et des résultats expérimentaux.

Cet oubli est souvent dû à une confusion entre *prédiction* et *conséquence déductive* d'une hypothèse. Comme on l'a vu dans le chapitre 6, section 6.3.1, Popper par exemple semble assimiler les deux en l'espace d'une parenthèse : « l'évaluation de l'hypothèse repose seulement sur les conséquences *déductives* (les prédictions) qui peuvent être tirées de l'hypothèse. »²⁵.

Mais il n'est pas suffisant de définir une prédiction comme la conséquence d'une hypothèse, d'une théorie ou d'un modèle. En effet, si l'on pose l'hypothèse h , alors l'énoncé « h ou h' » (où h' est une hypothèse différente de h) est une conséquence de h . Mais on ne peut dire qu'il s'agisse d'une prédiction de cette hypothèse h , puisqu'une prédiction est censée fixer la valeur d'une variable.

Or, certaines de ces conséquences qui ne sont pas des prédictions peuvent aussi servir de *test* de cette théorie. Reprenons l'exemple du modèle d'Univers qu'Einstein a conçu en 1917 (voir chapitre 3, section 3.1.1) : le succès du modèle d'Univers d'Einstein n'était pas un succès prédictif mais consistait à prouver la cohérence logique de la théorie de la relativité générale en montrant que ces équations pouvaient être satisfaites par un modèle d'Univers stable (à la différence des modèles d'Univers issus de la théorie de la gravitation de Newton, comme l'avait montré Von Seeliger en 1895²⁶) et compatible avec le principe de Mach. C'est pourquoi Einstein affirmait, en conclusion de son article : « cette conception [de l'Univers] est exempte de contradiction logiques [...] ; ce n'est pas ici le lieu d'examiner si elle peut être soutenue du point de vue

²⁵POPPER, *The Logic of Scientific Discovery*, p. 317.

²⁶VON SEELIGER, "Über das Newton'sche Gravitationsgesetz".

des connaissances astronomiques actuelles »²⁷.

Cet exemple montre qu’il existe une classe de tests d’hypothèse que l’on peut appeler *les tests de cohérence*. À la suite de Kuhn²⁸, on peut distinguer deux catégories de tests de cohérence :

1. Les tests de cohérence interne, qui portent sur la consistance d’un ensemble d’hypothèses formant une théorie.
2. Les tests de cohérence externe, qui portent sur la compatibilité d’un ensemble d’hypothèses avec d’autres hypothèses ou d’autres théories.

Dans certains domaines scientifiques, ces tests sont de première importance et guident la recherche scientifique bien plus que tout test prédictif. C’est le cas par exemple de la physique théorique. On sait que lorsqu’on applique la théorie de la relativité générale à certains systèmes, on en déduit l’existence de *singularités*, c’est-à-dire des points de l’espace-temps où la densité et la courbure sont infinies (voir section 4.3.3). On sait aussi que ces singularités résultent de l’application de cette théorie à des échelles quantiques, parce qu’elle est incompatible avec la physique quantique qui ne décrit pas l’espace-temps comme un champ de gravitation relationnel. Les tentatives pour trouver une théorie globale (la théorie des cordes) dont la relativité générale et la physique quantique seraient des cas particuliers ou une théorie quantifiée de la gravitation (la théorie de la gravitation quantique à boucle) sont guidées uniquement par l’objectif de trouver une théorie qui soit à la fois cohérente et compatible avec la relativité générale et la physique quantique. Les quelques prédictions que l’on pourrait tirer de la théorie des cordes ou de la gravitation quantique à boucle ne préoccupent pas les chercheurs en physique théorique mais uniquement certains cosmologistes ou astrophysiciens. Ce sont donc les tests de cohérence qui sont primordiaux en physique théorique.

Bien que, comme on le montre plus loin, la cohérence d’une hypothèse ou d’une théorie ne soit pas indifférente à son succès prédictif, tester cette

²⁷EINSTEIN, “Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale”, p. 97.

²⁸Thomas KUHN, “Objectivité, jugement de valeur et choix d’une théorie”, *La Tension essentielle*, trad. par Pierre JACOB, Paris, 1990, p. 424–449, p. 426.

cohérence ne peut pas être considéré comme un test prédictif puisqu’il s’agit d’évaluer cette hypothèse ou théorie sur la base de ses conséquences non prédictives, c’est-à-dire celles qui concernent son statut théorique.

Maintenant que nous avons examiné les positions prédictivistes qui ne semblent pas soutenables, on peut examiner l’argument principal en faveur du prédictivisme et montrer pourquoi prédictivisme conditionnel faible semble la position la rationnelle.

7.2 La position dominante : le prédictivisme conditionnel faible

7.2.1 L’argument de la tricherie

Comme on l’a vu en conclusion du chapitre précédent (section 6.5), les principaux arguments prédictivistes sont *pratiques* : ils reposent sur le fait que les prédictions aident à éviter un certain nombre de biais dans la formulation de nouvelles hypothèses, tout en suggérant des manières efficaces de tester ces hypothèses.

Ces avantages pratiques des prédictions semblent montrer que, dans certaines situations, les tests prédictifs doivent être préférés aux autres tests d’hypothèse. Le point commun de ces arguments est que les prédictions permettent d’empêcher certains biais, falsifications ou ajustements forcés des hypothèses, c’est-à-dire des *tricheries* qui consistent à s’éloigner des canons d’une enquête scientifique rigoureuse en sacrifiant la simplicité de cette hypothèse ou en éliminant un certain nombre de données pour mieux la confirmer.

Ainsi, on peut regrouper ces arguments sous l’appellation que Peter Lipton (1954-2007), a donné à son argument en faveur du prédictivisme : l’argument de la tricherie (*fudging argument*).

Cet argument, formulé pour la première fois en 1991 dans la première édition de *Inference to the best explanation*²⁹, est une généralisation des

²⁹Peter LIPTON, *Inference to the Best Explanation*, 2^e éd., Londres, Routledge, 2004. On s’appuie ici sur la dernière version, à ma connaissance, de l’argument de Lipton, formulée en 2005 : Peter LIPTON, “Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice”, *Science* 307.5707 (2005), p. 219–221.

arguments pratiques en faveur du prédictivisme mentionnés ci-dessus.

Lipton commence par montrer les problèmes *logiques* de toute position prédictiviste (qu'il appelle *thèse de l'avantage des prédictions*) en imaginant la situation suivante : deux chercheuses formulent la même théorie, mais l'une connaissait les preuves de cette théorie avant de la formuler, tandis que l'autre les a prédites. Si ces deux chercheuses se rencontrent, elle devraient se mettre d'accord sur le degré de confirmation que ces preuves confèrent à leur théorie. Lipton pose alors la question suivante :

Mais sur quel degré devraient-elles s'accorder : celui plus grand de la chercheuse qui a prédit les preuves, celui plus faible de celle qui a ajusté sa théorie aux preuves, ou quelque part entre les deux³⁰ ?

Lipton considère qu'il existe un argument pour montrer que les chercheuses devraient s'accorder sur le degré de confirmation le plus haut parce qu'il montre « qu'une hypothèse conçue pour s'ajuster aux données affaiblit l'inférence qui va de l'adéquation de cette hypothèse aux données à la validité de cette hypothèse »³¹.

Il commence par remarquer qu'il existe un certain nombre de « vertus » des données qui en font de bonnes preuves : leur nombre, mais aussi leur diversité, leur précision ou l'absence de perturbations (le bruit) dans les mesures qui ont fourni les données. Lipton présente aussi un certain nombre de vertus théoriques, c'est-à-dire de caractéristiques valorisées si une hypothèse les possède : la plausibilité initiale de cette hypothèse, son accord avec d'autres hypothèses déjà acceptées, l'absence d'hypothèses rivales sérieuses, la plausibilité des hypothèses auxiliaires qui l'accompagnent et sa simplicité. Je regrouperai ces vertus théoriques et empiriques sous le nom de *vertus épistémiques*. On examine plus loin dans ce chapitre les vertus épistémiques, mais on peut admettre, avec Lipton, que si leur *définition* est sujette à débat, cette liste de vertu est assez

³⁰LIPTON, "Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice", p. 219. Cette question est une illustration du problème de Keynes : la relation de confirmation ne devrait pas faire intervenir d'autres informations que celles qui concernent la preuve, l'hypothèse et leurs relations logiques.

³¹LIPTON, "Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice", p. 220.

peu controversée. L'existence de telles vertus qui permettent d'évaluer la qualité des preuves et des hypothèses constitue la première prémisse de l'argument de la tricherie.

La deuxième prémisse de l'argument est que « certaines vertus des preuves sont en tension avec des vertus théoriques »³². L'exemple que prend Lipton est la tension entre la *diversité* des données et la *simplicité* de l'hypothèse. Si l'on a des données de nature très variée, on peut être tenté de sacrifier la simplicité de l'hypothèse et d'utiliser une conjonction de nombreuses hypothèses *ad hoc* pour rendre compte de ces données. Lipton imagine ainsi que l'on pourrait rajouter, pour chaque nouveau fait, une nouvelle hypothèse, comme s'il constituait une encyclopédie. Ce que l'on a nommé ci-dessus l'*ajustement forcé* de l'hypothèse aux données est un autre exemple de sacrifice de la simplicité. En effet, lorsque l'on formule une hypothèse sur la base de données déjà existantes, on peut être tenté de formuler une hypothèse qui rend très précisément compte des données mais qui est si complexe qu'elle est inutilisable pour d'autres données. Cela revient à chercher une hypothèse qui soit tellement adéquate aux données qu'elle perde en simplicité.

On peut aussi concevoir, bien que Lipton ne le fasse pas, une tricherie symétrique, qui consisterait à sacrifier la diversité des données pour conserver la simplicité de l'hypothèse : c'est ce qui se passe lorsque l'on cède au biais de confirmation. Une chercheuse qui aurait fourni un modèle démographique de tous les pays européens mais qui refuserait de prendre en compte les données démographiques de la Belgique parce qu'elles ne s'accordent pas avec son modèle serait par exemple coupable d'une telle tricherie.

Ainsi, il existe différents types de tricherie consistant à sacrifier l'une ou l'autre de deux vertus épistémiques en tension. Mais, comme on l'a vu, on peut remédier à chacun de ces cas par un test prédictif. La raison en est simple :

Une chercheuse peut, parfois sans le réaliser consciemment, tricher avec son hypothèse, en la tordant pour s'assurer qu'elle couvre plus de données. Dans le cas d'une prédiction,

³²LIPTON, "Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice", p. 220.

au contraire, il n’y a aucun motif pour introduire quoique ce soit d’artificiel dans l’hypothèse, parce que la chercheuse ne sait pas par avance quelle va être la bonne réponse et donc ne sait pas comment la tordre pour l’ajuster aux données. Donc, dans ce cas, la scientifique utilisera sa meilleure hypothèse qui, si sa prédiction réussit, manifesterà à la fois des vertus empiriques et théoriques³³.

C’est pourquoi la chercheuse qui n’a pas réalisé de prédiction avec son hypothèse devrait s’accorder sur le degré de confirmation de celle qui en a réalisé une. En effet, si elle est sont toutes deux parvenues à la *même* hypothèse, cela signifie qu’elles ont abouti à une hypothèse aussi simple et qui rend compte des mêmes données. La chercheuse qui a formulé son hypothèse en l’ajustant aux données déjà connues n’a donc pas sacrifié la simplicité de son hypothèse : elle n’est coupable d’aucune tricherie et il n’y a aucune raison qu’elle n’accorde pas le même degré de confirmation à son hypothèse que celle qui l’a utilisée pour prédire de nouvelles données.

Ainsi, comme on le voit, l’argument de la tricherie généralise les arguments pratiques en faveur des prédictions et leur donne un cadre commun, celui des vertus épistémiques. C’est ce cadre qui permet au prédictivisme de Lipton d’échapper aux problèmes de Mill et de Keynes (voir chapitre 6, section 6.5) en donnant une explication rationnelle du fait que l’on est plus impressionné par les succès prédictifs que par d’autres succès. Si l’on reformule l’argument de la tricherie, on voit qu’il ne repose que sur les caractéristiques intrinsèques des preuves, des hypothèses et leurs relations logiques :

Prémisse 1 : parmi les *caractéristiques intrinsèques* des preuves et des hypothèses, on trouve des vertus empiriques telles que la précision et la diversité des données et des vertus théoriques telles que la simplicité et la plausibilité des hypothèses auxiliaires.

Prémisse 2 : les *relations logiques* entre ces vertus sont telles qu’il y a un risque de tricherie, c’est-à-dire qu’il est possible

³³LIPTON, “Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice”, p. 221.

de maximiser certaines vertus empiriques aux dépens de vertus théoriques et réciproquement.

Prémisse 3 : il est impossible de maximiser ou de sacrifier les vertus empiriques des données sans avoir accès à ces données.

Conclusion : donc, si une preuve est prédite, il n'y pas eu de tricherie, c'est-à-dire qu'aucune vertu empirique n'a été maximisée aux dépens de vertus théoriques et réciproquement.

Dans la sous-section suivante, en m'appuyant sur une autre version de l'argument de la tricherie, je montre que cet argument peut mener au mieux à un prédictivisme conditionnel qui n'accorde aux succès prédictifs qu'un rôle auxiliaire dans les théories de la confirmation.

7.2.2 Le risque d'ajustement forcé et le critère d'information d'Akaike

En 2004, Christopher Hitchcock et Elliott Sober publient un article qui reprend, comme ils le reconnaissent eux-mêmes³⁴, l'argument de la tricherie de Lipton, mais en montrant que celui-ci ne mène qu'à un prédictivisme conditionnel.

Les deux auteurs font remarquer que le risque de d'ajustement forcé des hypothèses, qu'ils nomment « sur-ajustement » (*overfitting*), est bien connu des scientifiques :

Pour les statisticiens, les mathématiciens appliqués et d'autres scientifiques qui construisent fréquemment des modèles [statistiques] pour donner du sens à des données, c'est un fait bien confirmé que plus les modèles sont complexes moins ils sont capables de prédire de nouvelles données³⁵.

L'analyse de C. Hitchcock et E. Sober s'appuie ainsi sur un domaine des mathématiques appliquées qui a pour tâche de résoudre des problèmes de prédiction : l'analyse prédictive en statistiques.

³⁴HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 19.

³⁵HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 11.

Le but de cette analyse est de trouver à partir d'un ensemble de données D_1 , le modèle qui permet de prédire le mieux un autre ensemble de données quelconques D_2 tirés de la même population D que D_1 . Par modèle statistique, on entend ici une hypothèse ayant au moins un paramètre libre, c'est-à-dire une équation possédant au moins un symbole dont on règle la valeur en fonction des données auxquelles l'ajuster. Si les données consistent en un ensemble de valeurs d'une variable Y en fonction d'une variable X (par exemple le volume d'un gaz en fonction de sa température) on peut représenter D_1 sous la forme de points dans un repère et le modèle à trouver est une courbe dont l'équation doit contenir au moins un paramètre à ajuster. On parle alors d'un *problème d'ajustement de courbe* (*curve-fitting problem*). Le modèle linéaire M par exemple est une ligne dont l'équation est $Y = aX + b$ (voir figure 7.2). Ce modèle a deux paramètres libres : a et b , le premier déterminant la pente de la droite et le deuxième son ordonnée à l'origine.

On rencontre ici une étape importante du travail des mathématiciens statisticiens : le problème du choix de la famille de modèle. Un modèle hyperbolique M' d'équation $Y = aX^2 + bX + c$ par exemple appartient à une autre famille de courbes que M et est considéré comme plus complexe puisqu'il a trois paramètres libres à ajuster : a , b et c .

Une fois la famille de modèle déterminée, il s'agit de fixer les paramètres de manière à trouver la courbe qui passe au plus près des points, c'est-à-dire la courbe la plus précise, la plus adéquate aux données. On mesure cet ajustement aux données en calculant la vraisemblance (*likelihood*) du modèle, qui correspond à la probabilité d'obtenir les données observées si l'on accepte ce modèle ($p(D|M)$). Or, comme l'avait déjà remarqué Peirce (voir section 6.1.3), on peut prouver que l'on peut réduire cet éloignement entre données et courbes à zéro, puisqu'il existe, pour toute répartition de n points de données dans un repère, une fonction polynomiale de degré $n-1$ (c'est-à-dire de la forme $Y = a_{n-1}X^{n-1} + \dots + a_1X + a_0$) qui passe par chacun des n points de donnée. Autrement dit, on peut toujours trouver un modèle M' dont l'ajustement aux données est maximal, même s'il est très complexe en raison de ses n paramètres libres (voir figure 7.2).

Mais lorsqu'on construit un tel modèle complexe à partir d'un ensemble D_1 de données et que l'on essaye ensuite de prédire avec lui un autre échantillon D_2 , on se rend compte qu'il a une faible vraisemblance par rapport aux données D_2 — c'est-à-dire une mauvaise précision sur l'échantillon des données prédites. À l'inverse, un modèle appartenant à une famille plus simple, comme un modèle linéaire par exemple, a plus de chance d'avoir un ajustement à des données prédites similaire à l'ajustement qu'il avait aux données utilisées pour sa formulation (voir figure 7.3). La raison en est que toute récolte de donnée comporte du *bruit*, c'est-à-dire un certain nombre de petites erreurs aux causes diverses (comme la chaleur d'un thermomètre ou les variations de la pression atmosphérique) qui dispersent le résultat des mesures de manière différente pour chaque échantillon. Par conséquent, si une hypothèse est trop ajustée à un échantillon de données, l'écart entre cette hypothèse et un autre échantillon de données risque d'être important puisque le bruit aura produit une nouvelle dispersion de données.

Ainsi, un modèle trop complexe « est trop sensible aux idiosyncrasies des données qui n'ont que peu de chances de réapparaître dans d'autres échantillons »³⁶. Mais si l'on soumet ce modèle à un test prédictif, c'est-à-dire portant sur un échantillon qui n'a pas été utilisé pour formuler cette hypothèse, alors le risque d'ajustement forcé disparaît.

L'argumentation de C. Hitchcock et E. Sober une étude de l'ajustement de courbe de modèles statistiques (*curve-fitting*) qui montre le risque d'ajustement forcé dans ces cas³⁷. Mais le fait qu'elle est construite sur des cas d'analyse statistique permet aux auteurs de mettre en lumière une des conséquences de cette argumentation : si l'on dispose d'un moyen de contrôler que l'hypothèse que l'on conçoit n'est pas ajustée de manière forcée, alors utiliser des prédictions pour tester une hypothèse devient superflu.

Or, d'après C. Hitchcock et H. Sober, il existe un tel moyen : un outil statistique nommé *critère d'information d'Akaike* (AIC), proposé

³⁶HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 11.

³⁷Leur argumentation est similaire à celle de Peirce (qui n'est pas cité dans l'article de C. Hitchcock et E. Sober) et de D. Mayo.

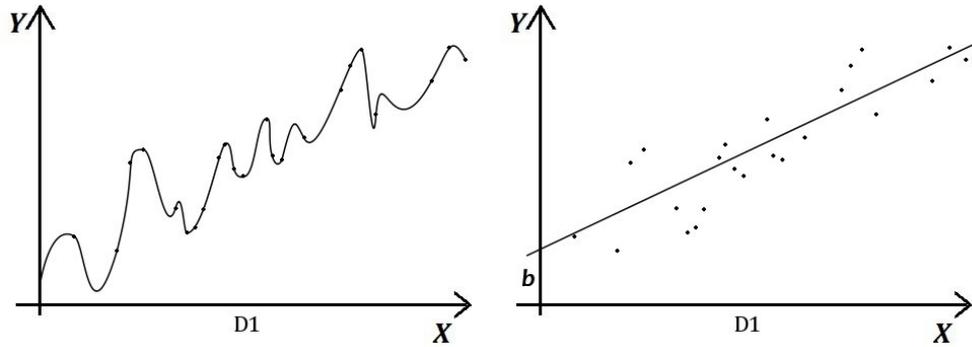


FIGURE 7.2 : Deux manières d'ajuster une courbe à un échantillon D_1 de n données représentées sous forme d'un nuage de points dans un repère : avec un polynôme de degré $n - 1$: $y = a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_1x + a_0$ (à gauche) ; ou avec un polynôme de degré 1 : $y = ax + b$ (à droite).

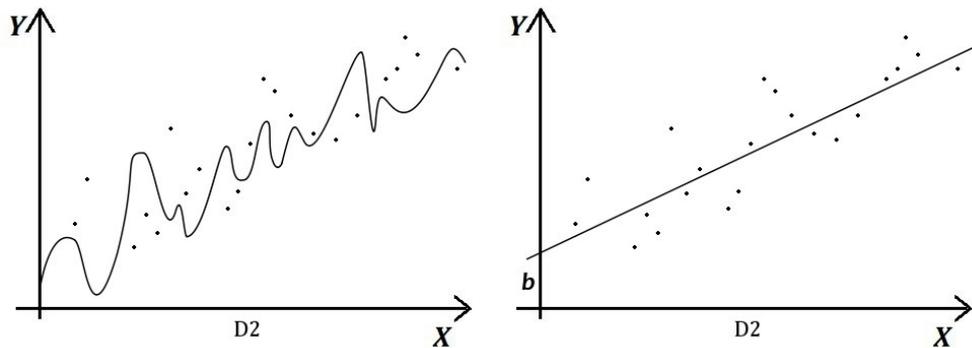


FIGURE 7.3 : Sur un autre échantillon de données D_2 , la courbe du polynôme de degré $n - 1$ est bien moins proche des données qu'elle ne l'était sur l'échantillon D_1 , tandis que la courbe du polynôme de degré 1 conserve la même précision. Cela est dû au fait que le bruit ne perturbe pas de la même manière les mesures lorsque l'on a récolté D_2 qu'il l'a fait lorsque l'on a récolté D_1 .

en 1973 par le statisticien japonais Hirotugu Akaike (1929-2009)³⁸. Ce critère permet, pour un ensemble de données particulier, d'attribuer à tout modèle un score qui mesure si son ajustement aux données ne s'est pas fait au détriment de sa simplicité³⁹ :

$$\text{score AIC}(M) = \log[p(\text{Données}|L(M))] - k \quad (7.1)$$

où M est un modèle statistique, $L(M)$ est l'ajustement des paramètres libres de ce modèle qui maximise sa vraisemblance aux données déjà connues, $\log[p(\text{Données}|L(M))]$ représente la mesure de son adéquation aux données disponibles et k est le nombre de paramètres ajustables de M (et représente donc la complexité de M).

Akaike a montré que plus le score AIC d'un modèle est important pour un ensemble de données, plus un modèle a de chances de prédire des données tirées de la même population sans que son ajustement aux données ne diminue. Autrement dit, le score AIC permet de mesurer la précision prédictive d'un modèle, c'est-à-dire la précision de ses prédictions⁴⁰.

D'après cette mesure, la perte en simplicité d'un modèle doit être compensée par un gain en vraisemblance de l'ordre d'une puissance de 10 (parce que l'adéquation aux données d'un modèle n'est pas mesurée directement par la vraisemblance du modèle, mais par le *logarithme* de cette vraisemblance). Sinon, le modèle sacrifie sa simplicité et perdra en précision lorsqu'il sera appliqué à d'autres données. Ce résultat conforte donc l'intuition des statisticiens et des mathématiciens qui considèrent que la simplicité est essentielle pour qu'un modèle réalise des prédictions précises.

Il faut remarquer que l'on peut évaluer le score AIC d'un modèle

³⁸Hirotugu AKAIKE, "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle", *2nd International Symposium on Information Theory*, Academiai Kiado, Budapest, 1973.

³⁹HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 12.

⁴⁰Pour une preuve que le score AIC mesure (sous certaines conditions) la précision prédictive d'un modèle, voir Malcolm FORSTER et Elliott SOBER, "How to tell when simpler, more unified, or less ad hoc theories will provide more accurate predictions", *British Journal for the Philosophy of Science* 45.1 (1994), p. 1-35.

en examinant son adéquation aux données qui ont servi à formuler ce modèle : il n’y a pas besoin de le tester sur d’autres échantillons. Le critère d’Akaike permet donc de mesurer la précision prédictive d’un modèle *sans avoir à réaliser et à tester de prédictions*. Dans notre exemple on pourrait, à partir de cette formule, calculer le score AIC de M et de M' uniquement en regardant leur nombre de paramètres ajustables et leur vraisemblance sur D_1 , c’est-à-dire avant même de les comparer à D_2 .

Ainsi, d’après C. Hitchcock et E. Sober, l’argument de l’ajustement forcé ne peut soutenir qu’une version conditionnelle du prédictivisme (qu’il nomment *locale*⁴¹) : ce n’est que dans les situations où l’on n’a aucun moyen de calculer le score AIC d’un modèle et qu’il y a un risque d’ajustement forcé qu’il est nécessaire de faire passer un test prédictif à ce modèle.

La manière dont C. Hitchcock et E. Sober formulent l’argument de la tricherie et l’appliquent au cas de l’analyse statistique permet de comprendre pourquoi cet argument mène nécessairement à un prédictivisme *heuristique et conditionnel*.

Il mène à un prédictivisme *heuristique* parce que, pour qu’il fonctionne, il est suffisant de supposer que les données que l’on utilise pour tester une hypothèse ne sont pas celles que l’on a utilisé pour formuler cette hypothèse. En effet, si des données n’ont pas servi à fixer les paramètres libres d’une hypothèse, on peut être certain que celle-ci n’est pas sur-ajustée à ces données et que sa simplicité n’a pas été sacrifiée. Il s’agit là de la définition *heuristique* des prédictions : un fait est heuristiquement nouveau par rapport à une hypothèse si celui-ci n’a pas servi pour fixer les paramètres libres de cette hypothèse (voir section 7.1.3)⁴².

Ensuite, que l’argument de la tricherie amène à un prédictivisme *conditionnel* provient du rôle qu’il donne aux prédictions : elles sont un garde-fou contre des méthodes de formulation d’hypothèses sacrifient certaines vertus épistémiques. Mais alors, il suffit de prouver qu’il existe

⁴¹HITCHCOCK et SOBER, “Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting”, p. 4.

⁴²Une définition heuristique des prédictions est suffisante pour que l’argument de la tricherie fonctionne mais n’est pas forcément *nécessaire*. Cela signifie que les prédictions théoriquement nouvelles peuvent *aussi* jouer un rôle dans cet argument, comme on le montre dans la dernière section de ce chapitre.

en droit d'autres garde-fou tout aussi efficaces que les tests prédictifs pour éviter ces tricheries (comme le critère d'information d'Akaike) afin de prouver qu'il n'est pas *toujours* nécessaire qu'il y ait prédiction pour qu'il y ait confirmation⁴³.

Si l'on considère que l'argument de la tricherie est le meilleur argument en faveur du prédictivisme, on est donc amené à un prédictivisme heuristique conditionnel. En outre, C. Hitchcock et E. Sober précisent cette position en ajoutant une distinction à celles que l'on a déjà mentionnées dans le chapitre 6 : la distinction entre prédictivisme *fort* et prédictivisme *faible*.

7.2.3 Le prédictivisme faible

La différence entre prédictivisme *fort* et *faible* est la suivante :

D'après le prédictivisme fort, les prédictions sont intrinsèquement supérieures aux ajustements d'une hypothèse. Le fait qu'une théorie prédise un phénomène alors qu'une autre ne fait que s'y ajuster est, en soi, un gage en faveur de cette théorie. D'après le prédictivisme faible, la différence entre une prédiction et l'ajustement d'une théorie n'est épistémologiquement pertinente que si elle est symptomatique d'autres différences qui ont de l'importance dans la preuve d'une hypothèse⁴⁴.

Le prédictivisme fort correspond à une position longtemps appelée *instrumentaliste* selon laquelle les théories sont avant tout des instruments pour réaliser des prédictions et donc toute prédiction est, en soi, un succès. Le prédictivisme faible consiste à mettre l'accent sur d'autres objectifs de l'activité scientifique et donc d'autres caractéristiques des

⁴³Comme on l'a vu ci-dessus, cette conséquence était déjà relevée par Peirce qui considérait (dans un parallèle frappant avec l'argumentation de C. Hitchcock et E. Sober) que si une hypothèse est suffisamment simple, on peut se dispenser de la prédésigner (voir section 6.1.4) et par D. Mayo qui montrait que l'on peut tester la signification statistique d'une hypothèse sur les données qui ont servi à la formuler si on prend garde à ne pas l'ajuster de manière forcée (voir section 7.1.3).

⁴⁴HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 4.

théories scientifiques, comme leur capacité à unifier ou à expliquer des phénomènes différents.

Depuis qu'elle a été introduite par C. Hitchcock et E. Sober, cette distinction est devenue canonique dans le débat sur le prédictivisme et le moins que l'on puisse dire, c'est que les partisans du prédictivisme fort ne se bousculent pas au portillon. L'immense majorité des participants à ce débat considèrent qu'un succès prédictif est le signe d'autres caractéristiques d'une hypothèse : son pouvoir explicatif (D. Harker)⁴⁵, sa simplicité (Lipton, C. Hitchcock et E. Sober mais aussi Malcom Forster⁴⁶), son caractère non *ad hoc* (É. Zahar et J. Worrall) ou la sévérité des tests qu'elle a passés (D. Mayo).

Le fait que le prédictivisme conditionnel faible soit la position dominante dans le débat sur le prédictivisme montre que les succès prédictifs ne jouent actuellement qu'un rôle périphérique dans les théories de la confirmation : elles permettent de s'assurer de la présence de certaines vertus épistémiques, mais ce sont ces vertus qui ont de l'importance et les prédictions n'ont un rôle à jouer que si l'on ne peut pas constater ces vertus par d'autres moyens.

Dans la suite de ce chapitre je montre les limites de cette position actuellement dominante dans le débat sur le prédictivisme en m'appuyant sur la nature et le rôle des vertus épistémiques dans la confirmation des théories.

7.3 Les limites *pratiques* du prédictivisme conditionnel

Dans les deux sections qui suivent, je présente des objections au prédictivisme conditionnel faible, qui doivent beaucoup aux travaux de Heather Douglas⁴⁷, en distinguant les limites pratiques du prédictivisme condi-

⁴⁵Voir David HARKER, "On the Predilections for Predictions", *British Journal for the Philosophy of Science* 59.3 (2008), p. 429–453

⁴⁶FORSTER et SOBER, "How to tell when simpler, more unified, or less ad hoc theories will provide more accurate predictions".

⁴⁷Voir notamment DOUGLAS, "Reintroducing prediction to explanation" et DOUGLAS et MAGNUS, "State of the Field".

tionnel et les limites conceptuelles du prédictivisme faible et de toute conception de la confirmation fondée sur la notion de vertu épistémique.

7.3.1 Prédications de faits d'un même genre et prédictions de faits d'un genre nouveau

La première remarque que l'on peut faire au sujet du prédictivisme conditionnel soutenu par C. Hitchcock et E. Sober est qu'ils proposent certes un moyen d'évaluer si une hypothèse n'est pas ajustée de manière forcée à des données (le critère d'information d'Akaike), mais que ce critère ne s'applique qu'à une classe de problèmes restreinte : les problèmes d'*interpolation*, où l'on examine les performances d'une hypothèse uniquement sur des échantillons tirés d'une même population⁴⁸.

Le score AIC permet, à partir de l'ajustement d'un modèle à un échantillon de données D_1 , d'évaluer la précision de ses prédictions à la condition que ces prédictions portent sur un échantillon D_2 tiré de la même population D que D_1 . Le score AIC ne permet donc pas d'évaluer la capacité d'un modèle à prédire comment se comportent des grandeurs au-delà des limites de cette population. Ainsi, le critère d'Akaike est inutilisable pour traiter des problèmes dits d'*extrapolation*, où l'on cherche à déterminer la relation entre des variables X et Y au-delà des valeurs de X et de Y déjà observées dans les échantillons à notre disposition⁴⁹.

Ainsi, comme on l'avait déjà vu dans le cas des tests de signification statistique (section 7.1.2), même s'il peut exister d'autres méthodes que les tests prédictifs pour éviter l'ajustement forcé d'une hypothèse, à l'heure actuelle les critères d'information sont les seuls outils disponibles à cette fin. Les partisans du prédictivisme conditionnels doivent donc admettre qu'*en pratique* les tests prédictifs restent indispensables pour la partie de l'activité scientifique qui vise à faire des extrapolations.

⁴⁸Sur la différence entre interpolation et extrapolation, voir l'annexe du chapitre 1 consacrée à cette question.

⁴⁹Dans un article de 2000, M. Foster, qui a travaillé avec E. Sober à développer l'intérêt philosophique pour la question de la sélection des modèles statistiques, aborde la question des problèmes d'extrapolation et sa conclusion est qu'il n'existe pas encore, pour ces problèmes, de critère de sélection de modèles similaire à celui d'Akaike. Voir Malcolm FORSTER, "Key concepts in model selection : Performance and generalizability", *Journal of mathematical psychology* 44.1 (2000), p. 205–231, p. 230.

De plus, même s'il était possible de trouver l'équivalent du critère d'Akaike pour traiter des problèmes d'extrapolation, cela ne suffirait pas pour évincer toute forme de test prédictif. Comme le fait remarquer Wang-Yen Lee, dans les problèmes d'interpolation comme dans ceux d'extrapolation on utilise toujours une hypothèse pour rendre compte de nouvelles données (*new data*), mais pas de données d'un nouveau genre (*novel data*)⁵⁰. Cette distinction reprend celle que fait Whewell entre une hypothèse qui prédit des faits d'un même genre que ceux à partir desquels elle a été induite et une hypothèse qui prédit des faits d'un genre différent (voir section 6.1.1).

Même s'il est difficile de définir en quoi des faits font partie d'un même genre ou de genres différents, on peut montrer que les problèmes d'interpolation et d'extrapolation appartiennent aux cas de prédictions de faits d'un même genre. Si, par exemple, on applique la relation de Slipher-Hubble pour prédire la distance d'une galaxie qui a un décalage vers le rouge plus important que ceux qui ont été utilisés pour formuler cette relation, on réalise une extrapolation et pourtant on prédit des faits du même genre que ceux à partir desquels la relation de Slipher-Hubble a été formulée. En revanche, si on utilise une loi théorique comme la loi d'attraction universelle de Newton, qui fait intervenir les paramètres de la masse, de distance et de force, pour prédire une loi empirique comme la première loi de Kepler, qui fait intervenir les paramètres d'orbite des planètes et d'ellipse, on réalise une prédiction de faits d'un genre nouveau.

Ainsi, lorsque l'on réalise une prédiction de faits d'un genre nouveau, on utilise des lois théoriques qui changent l'interprétation des termes apparaissant dans les lois empiriques, tandis que lorsqu'on fait une extrapolation on ne fait qu'étendre le domaine d'un modèle statistique au-delà de sa population initiale. Donc même si l'on disposait d'un critère d'information efficace pour s'assurer qu'un modèle est apte à réaliser des extrapolations, il en faudrait encore un autre pour déterminer s'il peut réaliser des prédictions de faits d'un genre nouveau.

En résumé, si le prédictivisme conditionnel est une position correcte

⁵⁰Yen Lee WANG, "Akaike's Theorem and Weak Predictivism in Science", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 44.4 (2013), p. 594–599, p. 595.

en droit, il ne faut pas en conclure pour autant que les prédictions ont une place mineure *en fait* dans la confirmation des hypothèses. Il n’y a que pour les problèmes d’interpolation que l’on dispose d’un autre garde-fou contre l’ajustement forcé des hypothèses que les tests prédictifs. On ne dispose pas actuellement (mais rien ne dit que la situation restera en l’état) d’autres tests que les prédictions pour s’assurer qu’il n’y a pas eu de tricherie lorsque l’on aborde des problèmes d’extrapolations ou d’extension d’une théorie à des phénomènes d’un genre nouveau.

Il est donc nécessaire de prendre en compte toute la diversité des prédictions si l’on veut estimer leur place réelle dans la confirmation des hypothèses et des théories.

7.3.2 Les différents niveaux de l’activité scientifique et les prédictions

Comme on l’a vu dans la première partie de cette thèse, peu de philosophes des sciences ont prêté attention à la pluralité des prédictions (et donc des succès prédictifs), ce qui les amène fréquemment à tirer des conclusions générales sur *toutes* les prédictions alors que leurs arguments sont restreints à un type particulier de prédiction — comme c’est le cas de C. Hitchcock et E. Sober. Outre Whewell et Duhem, une exception notable est H. Douglas qui, dans un article co-écrit avec Paul Magnus, montre que les prédictions n’ont pas les mêmes caractéristiques et ne jouent pas le même rôle selon le « niveau » de l’activité scientifique auquel elles sont utilisées.

H. Douglas et P. Magnus distinguent en effet quatre niveaux de l’activité scientifique⁵¹ :

1. Les *données* brutes, comportant les erreurs de mesure et le bruit.
2. Les *phénomènes*. Reprenant ici une distinction entre données et phénomènes proposée par J. Bogen et J. Woodward⁵² (que nous avons discuté dans le chapitre 1, section 1.3.4), H. Douglas et P. Magnus définissent les phénomènes comme des régularités inférées à

⁵¹DOUGLAS et MAGNUS, “State of the Field”, p. 582.

⁵²BOGEN et WOODWARD, “Saving the phenomena”.

partir des données, régularités qui sont ensuite expliquées et prédites par les théories.

3. Les *théories*, qui sont des ensembles de lois ou de modèles visant à unifier et prédire des phénomènes.
4. Les *structures théoriques* (*framework*), incluant toutes les hypothèses auxiliaires et connaissances d'arrière plan qui permettent de développer une théorie. H. Douglas et P. Magnus considèrent que cette expression est synonyme celle *programme de recherche* au sens que Lakatos donne à ce terme (voir chapitre 6, section 6.3.2).

Remarquons d'abord que l'argument de la tricherie de Lipton s'applique à chacun de ces niveaux : quand on fait une inférence entre le niveau des données et celui des phénomènes, il y a un risque d'ajustement forcé et donc de sacrifice de la simplicité d'une hypothèse à la précision des données ; entre le niveau des phénomènes et des théories, on peut sacrifier la simplicité d'une théorie pour rendre compte de phénomènes de genres très différents ; enfin entre le niveau des théories et des programmes de recherche, la tricherie consiste à sacrifier la plausibilité des hypothèses auxiliaires d'un programme de recherche pour préserver la diversité des phénomènes dont il rend compte (c'est le problème soulevé par Duhem, voir chapitre 6, section 6.5 et l'annexe du chapitre 7).

Mais si l'argument de la tricherie s'applique à tous ces niveaux d'analyse de l'activité scientifique, d'après H. Douglas et P. Magnus, les prédictions ont une nature et un rôle différents selon qu'elles sont utilisées pour vérifier une inférence des données aux phénomènes, des phénomènes aux théories ou des théories aux structures théoriques. Ainsi, s'ils reconnaissent que lorsqu'on infère des données aux phénomènes, alors « l'avantage des nouvelles prédictions à ce niveau peut être remplacé par la machinerie du critère d'information d'Akaike »⁵³, ce n'est pas le cas entre le niveau des phénomènes et des théories :

De même que la projection des phénomènes peut être sur-ajustée aux données, les théories peuvent être sur-ajustées

⁵³DOUGLAS et MAGNUS, "State of the Field", p. 583.

aux phénomènes déjà connus. À la différence des problèmes d'ajustement de courbe, cependant, il n'y a aucune procédure formelle comme le critère d'information d'Akaike pour nous aider au niveau des théories⁵⁴.

C'est pourtant à ce niveau qu'ont lieu les prédictions de phénomènes d'un genre nouveau. Si l'on adopte la séparation entre les confirmations des phénomènes à partir des données et les confirmations des théories à partir des phénomènes, on peut alors affirmer que les prédictions ont plus de poids dans les secondes que dans les premières.

H. Douglas et P. Magnus accordent encore plus d'importance aux prédictions dans la confirmation des structures théoriques, c'est-à-dire des programmes de recherche : « le fait qu'une structure théorique génère des théories ayant des succès prédictifs nous donne une raison *prima facie* de l'adopter ou d'y adhérer »⁵⁵. Ils acceptent donc explicitement la thèse de Lakatos selon laquelle un programme de recherche est en progrès s'il permet ce type de prédiction (même s'ils refusent d'y voir la *seule* forme de confirmation d'un programme de recherche).

L'intérêt de cette distinction entre différents niveaux de l'activité scientifique est de montrer que même si l'argument de la tricherie de Lipton est un argument suffisamment général pour s'appliquer à tous ces niveaux et que cet argument amène nécessairement à un prédictivisme conditionnel (puisque les prédictions n'y jouent que le rôle de garde-fou contre d'éventuelles tricheries), cela ne signifie pas pour autant que les prédictions ont le même poids dans la confirmation à chacun de ces niveaux. En effet, selon le niveau envisagé, on ne dispose pas forcément d'un autre garde-fou que les tests prédictifs pour éviter les tricheries.

Si l'on reprend la typologie entre les trois types de raisonnement prédictifs que j'ai présentée dans la conclusion de la première partie de cette thèse, cela permet de préciser quels types de prédictions jouent un rôle important dans la confirmation des hypothèses.

- Les prédictions *guidées par des données* sont celles qui permettent d'inférer l'existence d'un phénomène à partir de données : elles ont

⁵⁴DOUGLAS et MAGNUS, "State of the Field", p. 584.

⁵⁵DOUGLAS et MAGNUS, "State of the Field", p. 585.

une grande importance dans la prévision d'événements à venir, dans l'innovation, dans la gestion de données massives, mais ne jouent pas un rôle de test déterminant s'il existe des procédures comme le critère d'information d'Akaike qui permettent de s'assurer que les hypothèses et modèles statistiques rendant compte de ces données ont été formulés sans ajustement forcé.

- Les prédictions *guidées par des modèles* interviennent au niveau que H. Douglas et P. Magnus nomment *théorie*. En effet, ces modèles ont pour objectif de prédire (ou d'expliquer) non pas des données brutes mais des phénomènes⁵⁶. Le phénomène de la récession des galaxies par exemple a été prédit à partir d'un modèle d'Univers fondé sur les équations de la relativité générale et d'un grand nombre d'hypothèses auxiliaires (voir chapitre 3, section 3.2.3).
- Les prédictions *guidées par des lois* peuvent elles être utilisées au niveau de ce que H. Douglas et P. Magnus appellent une structure théorique et qui correspond à la notion de programme de recherche. En effet, comme on l'a vu dans la section 6.3.2, pour la méthodologie des programmes de recherche, les différentes théories qui participent à un même programme de recherche possèdent le même noyau dur d'hypothèses irréfutables et ce noyau dur est souvent constitué d'un nombre relativement restreint de lois théoriques (par exemple les trois lois du mouvement et la loi de l'attraction universelle dans le programme de recherche newtonien).

On peut donc à présent commencer à répondre à la première question posée dans ce chapitre : quelles prédictions jouent un rôle important dans la confirmation des hypothèses ? Ce sont certaines prédictions guidées par des modèles et guidées par des lois, parce qu'elles représentent des tests pour éviter les cas de tricheries et que l'on ne dispose pas actuel-

⁵⁶Il faut être vigilant à la différence entre un *modèle* au sens défini dans la première partie de cette thèse et les *modèles statistiques* dont on parle dans les problèmes d'ajustement de courbes. Ces modèles statistiques sont en réalité des *hypothèses* qui prennent la forme d'équations approchant des données brutes. En revanche, les modèles utilisés par exemple en biologie ou en géologie sont des représentations partielles et indirectes de systèmes empiriques.

lement d'autres tests qu'elles pour repérer les tricheries qui concernent les théories et les programmes de recherche.

Pour pouvoir caractériser plus précisément ces prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation des hypothèses et des théories, il faut d'abord analyser en quoi consiste le rôle des prédictions dans la confirmation, c'est-à-dire pourquoi il est si important d'éviter les tricheries.

7.4 Les limites *conceptuelles* du prédictivisme faible

7.4.1 L'ambiguïté du prédictivisme faible

La position dominante dans le débat sur le prédictivisme étant le prédictivisme *faible*, la portée des succès prédictif semble d'être des *signes* ou des *symptômes* de l'absence de tricherie. Autrement dit, les prédictions réussies sont des *intermédiaires* entre les vertus théoriques ou empiriques d'une situation de confirmation et les scientifiques. Cependant, cette position est ambiguë et la distinction entre prédictivisme fort et faible est elle-même problématique.

Si l'on remonte à l'origine de cette distinction, c'est-à-dire à l'article de C. Hitchcock et E. Sober de 2004, on se rend compte qu'elle est loin d'être évidente, y compris pour leurs auteurs. En effet, C. Hitchcock et E. Sober déclarent soutenir un prédictivisme faible, puisque pour eux le succès prédictif n'est pas *en soi* le succès déterminant d'un modèle statistique. Le succès prédictif n'est que le signe de ce qui compte réellement pour qu'un modèle statistique soit acceptable : le fait qu'il soit bien équilibré entre simplicité et adéquation aux données.

Et pourtant, les deux auteurs affirment, au début de leur article, qu'ils « adoptent une perspective largement instrumentaliste d'après laquelle un des objectifs importants de la théorisation scientifique est d'identifier les hypothèses qui génèrent des prédictions précises »⁵⁷. C'est au nom de cet instrumentalisme qu'ils considèrent que les modèles statistiques

⁵⁷HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 2-3.

ajustés de manière forcée « commettent un péché méthodologique »⁵⁸, puisque le principal défaut d'un modèle ajusté de manière forcée est de ne pas prédire avec autant de précision d'autres échantillons de données que celui auquel il est ajusté.

Autrement dit, l'équilibre entre simplicité et ajustement aux données n'est pas non plus, pour C. Hitchcock et E. Sober, ce qui compte *en soi* pour qu'un modèle soit valide. Cet équilibre n'est lui-même qu'une condition de ce qui compte réellement : la précision prédictive des modèles (*predictive accuracy*), c'est-à-dire la capacité d'un modèle à être adéquat à des données précises. C'est pourquoi, tout en soutenant un prédictivisme faible de façade, C. Hitchcock et E. Sober affirment aussi que :

Dans une perspective instrumentaliste [qui est la leur], le succès prédictif n'est pas seulement symptomatique d'un succès scientifique ; il est aussi constitutif de ce succès. Nous voulons soutenir une conclusion encore plus forte : le succès prédictif de T_p [une théorie testée par une prédiction] vis-à-vis de D_2 peut parfois nous donner de bonnes raisons de nous attendre à ce que T_p soit bien mieux ajustée que T_a [une théorie ajustée à un échantillon] à des données qui n'ont pas encore été récoltées⁵⁹.

On touche ici du doigt l'ambiguïté de la distinction entre prédictivisme faible et prédictivisme fort : pourquoi ne pas considérer que la précision prédictive est *elle aussi* une vertu épistémique, au même titre que la simplicité ou la précision des données ? Les vices et vertus épistémiques ne forment pas un ensemble aussi cohérent que les vices et vertus morales dans la philosophie de Thomas d'Aquin et il n'y a pas de raison de penser que la précision prédictive ne puisse pas être une vertu épistémique cardinale, surtout dans une perspective instrumentaliste. On pourrait même soutenir que la précision prédictive a, dans l'argumentation de C. Hitchcock et E. Sober, la même fonction que Platon donne à

⁵⁸HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 3.

⁵⁹HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", p. 10.

la tempérance ($\sigma\omega\varphi\rho\omega\nu$) dans le *Gorgias* (509c) : c'est à la fois une vertu qui résulte de l'équilibre des autres (du courage, de l'intelligence, de l'humilité, etc.) et une vertu sans laquelle les autres sont inutiles, puisque, prenant le pas les unes sur les autres, elles risquent de mener à une vie d'excès. De même la précision prédictive, dans l'article de C. Hitchcock et E. Sober, résulte des vertus de simplicité et d'ajustement à des données précises et empêche que l'une de ces vertus prenne le pas sur les autres.

En somme, si l'on considère ainsi la précision prédictive d'une hypothèse comme une de ses vertus épistémiques, le prédictivisme faible de C. Hitchcock et E. Sober se retourne en un prédictivisme fort. En effet, puisque cette vertu indique si un modèle statistique est un outil prédictif précis, les succès prédictifs ne sont que les signes d'autres succès prédictifs à venir.

7.4.2 La capacité prédictive des théories comme compromis entre vertus épistémiques

L'ambiguïté de la notion de prédictivisme « faible » implique qu'il est tout autant possible de soutenir une position prédictiviste forte à partir de l'argument de la tricherie, si l'on donne une définition en termes de vertus épistémiques de ce que l'on appelle la *capacité prédictive des théories*.

La capacité prédictive d'une théorie est la mesure du nombre, de la diversité et de la précision des prédictions dans lesquelles une théorie est impliquée (voir chapitre 4, section 4.1.3). Autrement dit, une théorie qui a une grande capacité prédictive est une théorie dont les preuves ont les vertus empiriques suivantes (si l'on se tient à la liste de vertus donnée par Lipton) : elles sont *précises* et *diverses*.

De plus, on sait, par l'argument de la tricherie, qu'une théorie qui est ajustée à de telles preuves risque de sacrifier les vertus théoriques suivantes : la *simplicité* et la *plausibilité des hypothèses auxiliaires* utilisées pour l'appliquer à des problèmes concrets.

Une théorie ayant une forte capacité prédictive est donc une théorie pour laquelle existe un équilibre entre ces quatre vertus épistémiques, sans quoi elle ne pourrait mener à de nouvelles prédictions : elle serait

soit trop ajustée à certaines données, soit trop complexe pour que l'on puisse en tirer des prédictions.

On trouve de nombreux articles sur les compromis (*trade-off*) entre vertus épistémiques dans l'étude des modélisations, notamment en biologie et en écologie⁶⁰, mais assez peu sur le rôle de ces compromis dans la confirmation des théories. On peut cependant s'inspirer de ces travaux pour essayer de définir ainsi la notion de capacité prédictive.

L'enseignement du critère d'information d'Akaike est que pour qu'une théorie ait une importante précision prédictive (c'est-à-dire soit capable de prédire de nouvelles données avec précision) il faut qu'elle trouve un équilibre entre deux vertus en tension : la simplicité de l'hypothèse et l'ajustement à des données précises.

Mais rappelons que pour évaluer une théorie ou un programme de recherche (et pas seulement un modèle statistique) il faut aussi évaluer sa capacité à prédire des phénomènes appartenant à des genres différents sans multiplier des hypothèses auxiliaires qui rendraient cette théorie inutilisable en pratique. Cet équilibre correspond à une vertu que j'appelle la *diversité prédictive* d'une théorie, mais cette vertu est identique à celle qui est parfois nommée l'« étendue » (*scope*) ou « pouvoir unificateur » d'une théorie.

Lorsque l'on applique une théorie ou un programme de recherche à un nouveau domaine de l'expérience, on peut toujours le faire en multipliant le nombre et la complexité des hypothèses auxiliaires. C'est ce que nous apprend le problème de Duhem (voir section 6.5 et l'annexe au chapitre 7) : il est toujours possible d'échapper à une réfutation en utilisant les hypothèses auxiliaires appropriées⁶¹.

⁶⁰Voir notamment l'article fondateur Richard LEVINS, "The strategy of model building in population biology", *American scientist* 54.4 (1966), p. 421–431. Pour un aperçu du débat contemporain, voir Michael WEISBERG, "Forty years of "The strategy" : Levins on model building and idealization", *Biology and Philosophy* 21.5 (2006), p. 623–645, John MATTHEWSON, "Trade-offs in model-building : a more target-oriented approach", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 42.2 (2011), p. 324–333 et Julie JEBEILE, "Explication et compréhension dans les sciences empiriques, les modèles scientifiques et le tournant computationnel", thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2013, p. 81-89.

⁶¹On peut décrire cette tricherie qui consiste à multiplier les hypothèses auxiliaires comme une procédure d'échappement *ad hoc* ou comme une perte de simplicité (comme le fait Lipton) mais il faut alors être conscient qu'il s'agit d'une autre forme de

Or, comme l'avait déjà remarqué Whewell (voir section 6.1.2), lorsqu'une hypothèse prédit des faits d'un genre différent, c'est-à-dire des phénomènes variés, sa complexité n'augmente pas (ou peu) : elle n'a pas besoin qu'on lui ajoute des hypothèses auxiliaires supplémentaires. L'un des succès de l'optique ondulatoire de Fresnel est qu'elle a été d'abord utilisée pour prédire les phénomènes de réflexion, réfraction et diffraction, mais qu'elle a ensuite permis de prédire des phénomènes de polarisation de la lumière. Or pour cela, Fresnel n'eut qu'à changer une seule hypothèse auxiliaire de sa théorie : l'hypothèse selon laquelle les ondes lumineuses sont des ondes longitudinales. En ne modifiant que cette hypothèse, les mêmes équations à la base de la théorie ondulatoire (les intégrales de Fresnel) purent prédire des phénomènes d'un genre nouveau. La théorie rivale, l'optique corpusculaire, avait dû au contraire s'adjoindre de nombreuses hypothèses auxiliaires portant sur les différents axes de rotation des corpuscules lumineux pour pouvoir rendre à la fois compte des phénomènes de polarisation, de réflexion et de diffraction. Ces hypothèses étaient d'autant plus encombrantes qu'elles semblaient peu plausibles aux yeux même des partisans de la théorie corpusculaire de la lumière, puisqu'elles donnaient un aspect périodique et oscillatoire aux particules lumineuses.

De même, la théorie de l'état stationnaire en cosmologie a été abandonnée parce que, pour s'adapter aux phénomènes découverts dans les années 1960 (notamment les quasars, la nucléosynthèse de l'hélium et le fond diffus cosmologique) elle avait dû s'embarrasser de nombreuses hypothèses auxiliaires qui la rendaient bien trop impraticable pour prédire ces nouveaux phénomènes (voir section 4.3.1).

Ainsi, on note que, de même qu'un modèle ayant trop de paramètres libres à fixer a de mauvaises performances en termes de précision prédictive, une théorie (ou un programme de recherche) ayant trop d'hypothèses auxiliaires improbables a de mauvaises performances en termes de diversité prédictive parce qu'elle est trop ajustée à un domaine de l'expérience. On peut donc définir la diversité prédictive d'une théorie comme

simplicité que celle qui est sacrifiée quand on ajuste de manière forcée une hypothèse à des données précises.

une vertu épistémique qui consiste à trouver un compromis équilibré entre la diversité des preuves et la plausibilité des hypothèses auxiliaires⁶².

Il est donc tout à fait possible de définir la capacité prédictive d'une théorie comme la conjonction de ces deux vertus : la précision prédictive et la diversité prédictive. Si l'on adopte cette définition, alors le même argument de la tricherie qui nous avait mené au prédictivisme faible se retourne et nous amène désormais à l'intuition instrumentaliste selon laquelle une théorie doit avant tout être conçue pour permettre de faire de nouvelles prédictions, de nouvelles découvertes et ainsi faire avancer nos connaissances empiriques. Nous aboutissons désormais à un prédictivisme fort.

L'intérêt de définir la capacité prédictive comme vertu épistémique est de montrer que la recherche de la cohérence et de la simplicité (voire de l'élégance) dans la formulation de nouvelles hypothèses n'est pas qu'un caprice de l'esprit humain ou un idéal de la raison : ces exigences permettent d'étendre la capacité prédictive de ces hypothèses et donc son domaine d'application empirique. Mais, comme toute vertu épistémique, il est impossible de la mesurer de manière univoque et claire et il est donc illusoire de vouloir l'ériger en étalon du choix des hypothèses — et c'est bien pour cela que les prédictions ont un rôle effectif à jouer dans la confirmation des hypothèses.

7.4.3 L'opacité des vertus épistémiques

En effet, s'il était possible d'attribuer un score univoque aux vertus de précision prédictive et de diversité prédictive, alors elles pourraient être utilisées comme des *critères de choix théoriques* pour sélectionner, entre deux théories rivales, celle qui a le plus de *capacité prédictive*. Cette vertu n'est pas différente de la *fécondité* d'une théorie, puisqu'une théorie ayant

⁶²On donne dans l'annexe 7 consacrée à la définition de la capacité prédictive une caractérisation précise de la capacité prédictive d'une théorie comme compromis entre vertus épistémiques. Une analyse bayésienne des vertus épistémiques permet de montrer que les deux vertus en tension sont la diversité des preuves et la probabilité conditionnelle d'une hypothèse auxiliaire par rapport à l'hypothèse fondamentale qu'elle accompagne. On montre ainsi que pour maintenir cet équilibre, toute perte en plausibilité des hypothèses auxiliaires d'une théorie doit être compensée par une augmentation proportionnelle de la vraisemblance de cette théorie.

une grande capacité prédictive ne commet aucune tricherie qui pourrait l'empêcher de mener à de nouvelles découvertes. Elle mériterait donc qu'on lui consacre le plus d'efforts et de fonds. Cependant, comme toute approche de la confirmation fondée sur l'analyse des vertus épistémiques, cet espoir de pouvoir évaluer sans ambiguïté la capacité prédictive d'une théorie est voué à faire long feu, parce que les vertus épistémiques sont opaques et ne se laissent pas mesurer de manière univoque.

En théorie de la confirmation, c'est presque devenu un truisme que de faire remarquer qu'aucune définition des vertus épistémiques ne peut être donnée sans ambiguïté ni équivoque. J. Worrall remarque ainsi avec un certain humour :

Un des relecteurs m'a demandé une définition générale du caractère « naturel » d'une prédiction. Je suis malheureusement, mais de manière prévisible, incapable de répondre à sa requête. Comme tous ces philosophes des sciences qui ont invoqué le caractère « naturel » d'une hypothèse, ou ses proches parents l'« unité » et la « simplicité », je suis incapable d'en fournir une caractérisation adéquate et non-circulaire. Tout ce que je peux faire, c'est d'éclaircir notre intuition en l'illustrant par des exemples⁶³.

Il pourrait pourtant sembler qu'il soit possible, dans certains contextes, de donner une définition suffisamment précise de ce qu'est la simplicité d'une hypothèse. C'est ce que font C. Hitchcock et E. Sober en définissant la simplicité d'un modèle statistique à partir du nombre de paramètres libres qu'il possède. Mais le problème est que cette définition ne fonctionne pas si on l'extrait de ce contexte.

M. Forster et E. Sober par exemple, tentent de calculer le score AIC du système copernicien pour vérifier s'il est bien supérieur en simplicité au système ptoléméen. Considérant que chaque épicycle du système ptoléméen comporte quatre paramètres ajustables, ils arrivent à la conclusion que celui-ci avait 20 paramètres libres de plus que le système copernicien. Il aurait donc fallu que la vraisemblance du système ptoléméen soit 485

⁶³WORRALL, "Prediction and accommodation revisited", p. 57.

millions de fois supérieure à celle du système copernicien pour qu'ils aient le même score AIC.

Mais cette manière d'aborder l'histoire des sciences est arbitraire et artificielle. Peu importe le nombre d'épicycles de chaque système, le problème était que les partisans de Copernic n'étaient pas d'accord avec ceux de Ptolémée *sur ce qui comptait pour définir la simplicité*. Pour les soutiens de Copernic, son système était le plus simple parce qu'il n'utilisait aucun épicycle pour expliquer les rétrogradations des planètes. Pour les partisans de Ptolémée, le scandale en terme de simplicité ne concernait pas les épicycles, mais les mouvements que Copernic attribuait à la Terre pour rendre compte de l'alternance jour-nuit et du passage des saisons. En faisant de la Terre une planète, le système copernicien demandait d'expliquer pourquoi nous ne ressentions pas ces mouvements, pourquoi les projectiles en chute libre semblent suivre une ligne droite et comment les oiseaux et les nuages font pour suivre la rotation terrestre sans toucher le sol. C'est pourquoi, lorsque Galilée (1564-1642) défend le système de Copernic dans *Le Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* en 1632, il ne consacre qu'un quart de l'ouvrage (une journée sur quatre) aux aspects astronomiques du système copernicien : la majorité de ses arguments est consacrée à répondre aux objections des tenants de la physique aristotélicienne concernant le mouvement de la Terre.

Cet exemple de la controverse entre les partisans des systèmes ptoléméens et coperniciens montre que les scientifiques ne sont pas plus d'accord sur la notion de simplicité que les philosophes des sciences et que les débats scientifiques ne portent pas seulement sur la question de savoir quelle hypothèse ou théorie est la plus simple : ils portent aussi et surtout sur la question de savoir en quoi consiste la simplicité.

Un autre exemple de débat de ce type est celui qui opposa les partisans de la théorie du big bang et ceux de la théorie de l'état stationnaire, débat que l'on a étudié dans la deuxième partie de cette thèse (voir chapitre 4, section 4.2.1). Pour les partisans de la théorie du big bang, il était bien plus plausible de supposer qu'il n'y avait aucune création continue de matière dans l'Univers, parce qu'une telle création violerait le principe de conservation de l'énergie. Pour les partisans de l'état stationnaire, suppo-

ser que toute la matière avait été créée en un instant au commencement de l'Univers était bien plus coûteux en terme de plausibilité, parce que cela faisait de la création de matière un phénomène « métaphysique », hors de portée de toute observation. La vertu théorique de plausibilité d'hypothèses auxiliaires, comme la vertu de simplicité, ne fait consensus ni sur sa définition ni sur son extension⁶⁴.

Cette difficulté à définir et à attribuer des vertus épistémiques à des données, des hypothèses, des modèles ou des théories, montre que ni les scientifiques, ni les philosophes des sciences, ni même les historiens ne sont dans une position transparence vis-à-vis des hypothèses et de leurs preuves. On ne peut pas juger de la simplicité, de la plausibilité ou du pouvoir unificateur d'une théorie de manière toujours univoque parce que l'on n'a généralement pas d'accès global à une théorie et à toutes ses conséquences et développements possibles. Même requérir qu'une hypothèse soit adéquate aux données disponibles est un critère difficile à satisfaire de manière claire, puisque que cela peut mener à un ajustement forcé de cette hypothèse. C'est parce qu'aucun regard (même rétrospectif) sur une théorie et ses preuves ne peut embrasser toute que la capacité prédictive d'une théorie ne peut être mesurée qu'*en pratique*, en étudiant quels problèmes scientifiques on a pu traiter à partir d'elle (voir section 4.1.3 sur cette différence entre pouvoir prédictif et capacité prédictive).

Ainsi, dans le cours normal de l'activité scientifique, les vertus épistémiques sont trop *opaques* pour servir de critère de choix entre théories parce qu'elles ne peuvent être définies et attribuées de manière univoque. Kuhn, dans « Objectivité, jugement de valeur et choix d'une théorie »⁶⁵ montre que cette opacité est même *nécessaire* au changement scientifique. En effet, si ces vertus pouvaient servir ou de règles univoques de sélection théorique, alors aucune nouvelle théorie n'aurait jamais pu en supplanter une plus ancienne, parce qu'une nouvelle théorie est forcément moins

⁶⁴De plus, si l'on se penche sur les débats entre scientifiques, la question des vertus épistémiques redouble de difficulté, puisqu'en lieu et place des vertus épistémiques listées par Lipton, les scientifiques emploient souvent des vertus *esthétiques*, en parlant par exemple de l'*élégance* d'une preuve, ou de l'*harmonie* d'une théorie.

⁶⁵Thomas KUHN, "Objectivité, jugement de valeur et choix d'une théorie", *La tension essentielle : tradition et changement dans les sciences*, Bibliothèque des sciences humaines, Paris, France, Gallimard, 1990, p. 424–450.

étendue et moins développée qu'une théorie déjà implantée.

Il faut donc prendre garde de ne pas croire que la conception de la capacité prédictive que j'ai développée ci-dessus retombe dans l'idéal dénoncé par Kuhn d'une théorie de la confirmation qui se réduirait à un algorithme de sélection de théories⁶⁶. Même si j'admettais qu'il soit possible de quantifier précisément *une* vertu, je serais très loin de pouvoir quantifier la capacité prédictive d'une théorie, qui est évaluée sur la base de *quatre* vertus épistémiques⁶⁷ !

Cependant, effectivement, dans certains contextes, les vertus épistémiques apparaissent de manière exemplaire, de sorte qu'il est possible de dire clairement qu'une hypothèse est supérieure à une autre si l'on prend cette vertu comme critère. Par exemple, il fait peu de doutes que la théorie de la sélection naturelle de Darwin couvre un grand nombre de phénomènes différents, de l'anatomie comparée des espèces aux nombreux fossiles découverts, bien mieux que ses rivales créationnistes. Dans la fin de ce chapitre, je montre que c'est précisément en cela que consiste le rôle des prédictions dans la confirmation des hypothèses : certains succès prédictifs représentent des moments où des vertus, habituellement opaques, apparaissent de manière suffisamment claire et univoque pour être attribuées à une théorie.

⁶⁶KUHN, "Objectivité, jugement de valeur et choix d'une théorie", p. 431-432.

⁶⁷Il est possible, *en droit*, d'imaginer un monde où les chercheurs pourraient comparer les hypothèses entre elles sur la seule base de leur vertu épistémiques, parce qu'ils pourraient mesurer précisément la simplicité, la plausibilité, l'accord avec d'autres hypothèses, la diversité des preuves, leur précision, etc. Dans un tel monde, il serait possible de définir et de reconnaître le « meilleur système » théorique qui, selon David Lewis (1941-2001) équilibre la force et la simplicité des lois. Dans un tel monde, il ne serait pas nécessaire de recourir aux prédictions pour confirmer nos hypothèses : les prédictions ne serviraient qu'à étendre notre connaissance de la réalité. Mais, de toute évidence, nous ne vivons pas dans un tel monde et la théorie de la confirmation, aussi abstraite soit-elle, devrait être adaptée aux situations de confirmation de l'activité scientifique réelle.

7.5 Le rôle des prédictions fécondes dans le choix des hypothèses

7.5.1 Capacité prédictive et fécondité

Si l'on pouvait mesurer précisément les vertus épistémiques de deux théories, les prédictions ne joueraient aucun rôle dans la confirmation des théories : il suffirait de comparer un ensemble de données à un ensemble d'hypothèses pour s'assurer qu'ils possèdent tous deux les vertus suffisantes à une relation de confirmation.

Mais comme le font remarquer H. Douglas et P. Magnus (dont je m'inspire aussi ici pour la majeure partie de mon argumentation) :

La valeur des nouvelles prédictions est particulièrement claire pour les inférences de la science normale, concrète, parce que la structure complète d'une théorie en développement n'est pas accessible et que les caractéristiques d'un programme de recherche ne sont pas parfaitement articulées et peuvent rester tacites. [...] Des tests philosophiquement purs sont souvent coûteux ou requièrent des conditions idéales. À l'inverse, les nouvelles prédictions fournissent un test épistémique accessible et applicable⁶⁸.

Le principal argument en faveur des prédictions dans la confirmation des théories est donc l'opacité des vertus épistémiques elles-mêmes. Là où elles apparaissent clairement, on peut se passer de tests prédictifs, mais là où elles ne sont pas évidentes (quand deux théories rivales s'affrontent par exemple), les prédictions fournissent de bons indicateurs de leur présence.

Toutes les prédictions ne sont pas capables d'être de tels indicateurs et ne constituent donc pas des succès capables de confirmer une théorie. On étudie un exemple en détail dans la section suivante, mais rappelons ici l'exemple des prédictions tirées du premier modèle d'Univers d'Einstein (section 3.1.1) : ces prédictions n'étaient pas testables indépendamment du modèle d'Univers d'Einstein lui-même. Elles ne permettaient donc pas

⁶⁸DOUGLAS et MAGNUS, "State of the Field", p. 588.

de s'assurer que ce modèle n'était pas trop simple ou ajuster de manière forcée aux données.

À l'inverse que ce qui caractérisait les prédictions de la théorie du big bang (notamment la prédiction du fond diffus cosmologique) était leurs résultats précis qui ne supposaient pas tant d'hypothèses auxiliaires que les calculs en devenaient impossibles à réaliser (chapitre 4, section 4.3.2). C'est pourquoi Peeble par exemple affirmait, au sujet de cette théorie : « c'était amusant, parce qu'il s'agissait de sections efficaces, de thermodynamique ; c'était quelque chose que vous pouviez calculer et relier aux observations »⁶⁹.

Autrement dit, les scientifiques jugent de la capacité prédictive d'une théorie non sur ses vertus mais sur ses actes. Quand une théorie leur a permis, à de nombreuses reprises, de réaliser des prédictions réussies, ils ont des raisons de croire que sa simplicité, la plausibilité de ses hypothèses auxiliaires ou sa précision n'ont pas été sacrifiées⁷⁰. Rien n'empêche alors la capacité prédictive de cette théorie d'augmenter dans le futur.

Ce sont donc ces prédictions que l'on a appelées des *prédictions fécondes* qui jouent un rôle important dans le choix des hypothèses, parce qu'elles assurent les scientifiques que rien n'empêche la capacité prédictive d'une théorie de croître, c'est-à-dire de penser qu'elle est féconde. Et comme le fait remarquer Kuhn :

La fécondité [en tant que vertu épistémique] mérite plus d'intérêt qu'elle n'en a suscité. Un scientifique qui choisit entre deux théories sait d'ordinaire que sa décision aura des conséquences sur sa carrière de recherche. Bien sûr, il est particulièrement intéressé par une théorie qui promet des succès concrets pour lesquels les scientifiques sont d'ordinaire récompensés⁷¹.

Ainsi, si l'on admet que le destin d'une théorie ne se joue pas que sur

⁶⁹LIGHTMAN et BRAWER, *Origins*, p. 220.

⁷⁰C'est pourquoi, comme le suggérait Goodman, il est essentiel de prendre en compte, dans une relation de confirmation les « prédictions faites dans le passé et leur résultat que nous avons consignés », GOODMAN, *Faits, fictions et prédictions*, p. 96.

⁷¹KUHN, "Objectivité, jugement de valeur et choix d'une théorie", p. 426.

un succès prédictif mais sur le développement de sa capacité prédictive (développement qui peut être discontinu et connaître des phases de régression), alors il n'est pas plus irrationnel de juger qu'une théorie sera féconde parce qu'elle a développé une grande capacité prédictive que de juger qu'une personne est juste parce qu'elle a accompli de nombreux actes justes par le passé. Bien sûr, une telle supposition est toujours un pari risqué : même une personne qui a commis de nombreux actes justes peut commettre un jour un acte injuste et tout programme de recherche qui progresse peut être amené à dégénérer. Mais si ce pari est risqué, il n'en reste pas moins un pari qui peut être justifié rationnellement : le « bon sens » qui guide le choix des hypothèses n'est donc pas, comme le voudrait Duhem, qu'une qualité morale déconnectée de toute logique⁷².

7.5.2 Réponse au problème du chapitre

On peut désormais apporter une réponse complète à la première question de ce chapitre : quelles sont les prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation des hypothèses et des théories ? Ce sont les prédictions guidées par des lois ou des modèles qui font augmenter la confiance des scientifiques en la *fécondité* d'une théorie, c'est-à-dire en certaines vertus épistémiques qui entrent en jeu dans l'augmentation de la capacité prédictive d'une théorie. On a distingué, dans la section précédente, quatre vertus qui entrent dans la définition de la capacité prédictive d'une théorie : la précision et la diversité des données (vertus empiriques), simplicité et plausibilité des hypothèses auxiliaires (vertus théoriques). On peut ainsi identifier quatre types de prédictions fécondes correspondant à ces quatre vertus :

⁷²Même l'attention des scientifiques aux vertus *esthétiques* des théories peut s'expliquer ainsi de manière rationnelle. S'attacher à l'*harmonie* d'une théorie est sûrement un critère subjectif, mais la notion d'harmonie enveloppe souvent l'idée que la théorie ne s'accompagne pas d'hypothèses auxiliaires discordantes. De même, lorsqu'une preuve est ressentie comme *élégante*, il y a forcément une part de subjectivité qui s'exprime dans ce jugement, mais il indique aussi que la dérivation de la conséquence d'une théorie n'est pas trop complexe et donc que cette théorie peut réaliser des prédictions simplement. Ainsi, contrairement à ce que soutient Kuhn, la part subjective des jugements des scientifiques sur les vertus théoriques n'a pas que pour effet de faire diverger ces jugements : elle peut aussi mener à un accord intersubjectif.

- Les prédictions qui permettent de rendre plus précisément compte de certains phénomènes, comme les prédictions astronomiques à partir des lois de Kepler qui supplantèrent en une vingtaine d'années les autres méthodes d'éphémérides.
- Les prédictions qui montrent qu'une hypothèse est plus simple que sa ou ses rivales parce qu'elle a moins de paramètres libres. Les phénomènes de diffraction par exemple, ne demandent à fixer qu'un seul paramètre des intégrales de Fresnel pour être prédits par l'optique ondulatoire, alors qu'il faut fixer quatre paramètres des équations de l'optique corpusculaire pour arriver au même résultat.
- Les prédictions définies selon la conception théorique de Musgrave, c'est-à-dire qui rendent compte de phénomènes qui ne sont expliquées par aucune autre théorie, comme par exemple la prédiction des marées par la théorie de Newton. Ces prédictions théoriques font directement augmenter la diversité prédictive d'une théorie.
- Les prédictions qui montrent que l'on peut obtenir, avec des hypothèses auxiliaires moins improbables, un résultat déjà connu mais dont il était difficile de rendre compte. C'est le cas de la prédiction des rétrogradations des planètes dans le système copernicien par rapport à la même prédiction dans le système ptoléméen.

Cette liste montre qu'en l'absence d'autres tests des vertus épistémiques que les prédictions, certains succès prédictifs ont une portée suffisante pour fournir un accès à une ou plusieurs de ces vertus des théories, ou, du moins, pour permettre de comparer deux théories rivales en prenant ces vertus pour critères. Ces succès féconds ont une place, sinon essentielle, du moins centrale dans la confirmation des théories, place qui n'est pas due qu'à leur caractère impressionnant et qui ne leur est pas accordée par pure fantaisie.

On peut dès lors répondre à la deuxième question de ce chapitre : quel rôle jouent les prédictions dans la confirmation des théories ? Elles jouent un rôle pratique, mais qui n'est pas pour autant minime : celui de manifester certaines vertus théoriques et empiriques qui sinon resteraient opaques. Le rôle des prédictions est donc un rôle d'orientation :

elles indiquent aux scientifiques quelle(s) caractéristique(s) ont leurs hypothèses et théories et quelle(s) direction(s) peut prendre un programme de recherche pour développer sa capacité prédictive.

Dans la fin de cette section, je vais montrer que cette conception du rôle des prédictions dans le choix des hypothèses peut être appliquée à des cas concrets issus de l'histoire des sciences et de l'activité scientifique contemporaine pour résoudre d'apparents paradoxes concernant les succès et les échecs

7.5.3 Un succès prédictif paradoxal : la prédiction du retour de la comète de Halley par Clairaut

Au milieu du XVIII^e siècle, la recherche de comètes était devenue une affaire d'importance pour les astronomes européens. En effet, depuis la parution en 1705 du catalogue de vingt-quatre comètes de Edmond Halley (1656-1742), le calcul des orbites cométaires semblait pouvoir confirmer la théorie newtonienne de l'attraction. C'est dans ce contexte que Clairaut, notamment aidé de Joseph Lalande (1732-1807) et de Nicole-Reine Lepaute (1732-1788), entreprit de prédire avec précision le retour de la comète observée en 1682 à laquelle Halley avait attribué une période de soixante-quinze à soixante-seize ans. En effet, cette comète était passée deux fois à côté de Jupiter lors de sa révolution de 1682, ce qui, selon la théorie de la gravitation de Newton, aurait dû perturber son orbite.

En novembre 1758, après plus de quatre ans de travail, Clairaut annonça devant l'Académie des Sciences de Paris le passage au périhélie de la comète de Halley pour la mi-avril 1759, avec une incertitude d'un mois⁷³. Une incertitude d'un mois était loin d'être considérée comme un succès dans le domaine de l'astronomie. À la même époque, les éphémérides des satellites de Jupiter par exemple étaient calculés à la minute près⁷⁴. C'est pourquoi, comme le fait remarquer l'historien et mathématicien Dominique Tournès, les astronomes contemporains de Clairaut

⁷³Alexis CLAIRAUT, "Mémoire sur la comète de 1682, adressé à MM. les Auteurs du Journal des Sçavants", *Journal des savants* (1758).

⁷⁴C'est cette précision qui avait permis la première démonstration, par Ole Rømer (1644-1710), de la finitude de la vitesse de la lumière et ce en 1676, quatre-vingts ans avant la prédiction de Clairaut.

trouvèrent à bon droit que sa prédiction « n’apportait pas grand chose par rapport à la prévision de Halley »⁷⁵.

De plus, même avec une telle marge d’incertitude, la prédiction de Clairaut s’avéra fautive : le passage de la comète de Halley au périhélie fut observé le 13 mars 1759, à plus d’un mois de la mi-avril. Clairaut reprit d’ailleurs ses calculs à deux reprises (en 1760 et 1762) pour aboutir à une prédiction du passage de la comète à la date du 31 mars. La prédiction de Clairaut est donc, au pire, une prédiction réfutée par les observations et au mieux une prédiction entachée d’une incertitude d’une quinzaine de jours dans un domaine où la précision requise est de l’ordre de la minute, voire de la seconde.

Et pourtant cette prédiction est souvent célébrée par les astronomes, historiens et philosophes des sciences comme un succès prédictif majeur dans la confirmation de la théorie de Newton⁷⁶

Si l’on s’en tient à une conception de la confirmation comme simple adéquation entre un énoncé prédictif et des données, il est difficile de comprendre pourquoi la prédiction du retour de la comète de Halley par Clairaut peut être considérée comme un succès pour la théorie newtonienne de la gravitation, alors que les prédictions anthropiques n’ont pas sensiblement augmenté la confiance des cosmologistes en l’hypothèse du multivers. On se retrouve, comme dans le cas de la nouvelle énigme de l’induction de Goodman, à devoir différencier deux projections d’hypothèse, l’une considérée comme valide et l’autre non, sans pour autant avoir les moyens conceptuels de réaliser cette distinction.

La première étape pour résoudre ce paradoxe est de se pencher sur le raisonnement prédictif qui a permis à Clairaut de réaliser sa prédiction. Le problème soulevé par le retour de la comète de Halley est de calculer l’influence des perturbations gravitationnelles de Jupiter (et de Saturne, comme s’en aperçut rapidement Clairaut) sur l’orbite de cette comète. Or, si trois corps sont liés par des interactions gravitationnelles, il est quasiment impossible de trouver une solution analytique exacte aux

⁷⁵Dominique TOURNÈS, “L’intégration approchée des équations différentielles ordinaires (1671-1914)”, thèse de doct., Université Paris 7 Denis Diderot, 1996, p. 322.

⁷⁶Voir Pierre BRUNET, “La Vie et l’œuvre de Clairaut”, *Revue d’histoire des sciences et de leurs applications* 6.1 (1953), p. 1–17

équations du mouvement de ces corps⁷⁷.

Au milieu du XVIII^e siècle, cette difficulté était connue et Clairaut entreprit dès 1747 de trouver une autre manière de résoudre ce problème. En effet, à cette époque, Clairaut étudiait un problème qui avait tenu en échec Newton : le mouvement de l'apogée de la Lune, qui demande de prendre en compte l'attraction de la Terre et du Soleil. Ce mouvement est deux fois plus rapide que ne le prédisait la théorie de Newton, ce qui poussa même Clairaut à supposer comme première hypothèse une modification de la loi de gravitation de Newton en lui adjoignant un terme correctif proportionnel à la puissance quatrième de la distance entre les deux corps⁷⁸.

Mais Clairaut développa, en même temps que D'Alembert et Euler, une méthode de résolution du problème à trois corps par approximations successives qui permit de rendre compte de ce mouvement de l'apogée de la Lune sans avoir à modifier la théorie de Newton. Cette méthode dite *des perturbations* consiste à se limiter au premier abord au corps qui fait subir à l'orbite l'attraction la plus importante (la Terre dans le cas de la Lune) comme dans un problème à deux corps, pour calculer une orbite képlérienne idéale. Puis, dans un deuxième temps, on calcule à chaque unité de temps ou d'espace les autres facteurs qui perturbent cette orbite képlérienne idéale (la présence d'autres corps, les effets de marée, etc.)⁷⁹. On peut ainsi améliorer la précision des calculs en choisissant une unité de temps ou d'espace plus petite.

Pour le cas de la comète de Halley Clairaut procéda à une intégration numérique des équations de l'orbite perturbée et choisit de répéter l'opération pour chaque degré de la révolution de la comète. De plus, pour pouvoir prédire le retour de la comète, Clairaut dut prendre en compte deux révolutions de la comète, ce qui l'amena à calculer les perturbations

⁷⁷Une solution analytique exacte a été trouvée en 1909 par le mathématicien Karl Sundnam (1873-1949), mais, comme le montrent Julie Jebeile et Vincent Ardourel, elle est inutilisable pour réaliser des prédictions quantitatives. Voir Vincent ARDOUREL et Julie JEBEILE, "On the presumed superiority of analytical solutions over numerical methods", *European Journal for Philosophy of Science* (2016), p. 1–20.

⁷⁸TOURNÈS, "L'intégration approchée des équations différentielles ordinaires (1671-1914)", p. 256.

⁷⁹Voir TOURNÈS, "L'intégration approchée des équations différentielles ordinaires (1671-1914)", p. 20-26 pour le détail de ces méthodes.

pour 720 degrés. Le calcul pour chaque degré nécessitant cinq intégrations, la prédiction de Clairaut demanda donc, au total, 3600 intégrations et plusieurs dizaines milliers d'additions⁸⁰.

Même en mettant de côté l'aspect pharaonique de ce travail, la méthode utilisée par Clairaut pour prédire le retour de la comète de Halley est un succès impressionnant. Ce raisonnement prédictif montre que la méthode des perturbations est applicable concrètement et donne des résultats certes imparfaits, mais améliorables⁸¹

Autrement dit, la prédiction de Clairaut a prouvé que la méthode mathématique utilisée dans le raisonnement prédictif fonctionnait et que rien n'empêchait de réutiliser la même méthode en choisissant de faire plus de calculs afin de préciser la prédiction à satiété. De plus, la forme générale des équations de cette méthode permet de l'appliquer non seulement aux comètes et à la Lune, mais à tout système de trois corps (ou plus) liés par des interactions gravitationnelles. Chaque nouvelle extension ne demandera que du courage et avec cette méthode, on peut appliquer la théorie de Newton pour traiter un nombre beaucoup plus important de problèmes qu'on ne le pouvait auparavant. La prédiction de Clairaut est donc une prédiction féconde dont la réussite représente un succès pour la théorie de Newton puisqu'elle ouvrait la possibilité d'accroître énormément la capacité prédictive de cette théorie.

On comprend ainsi pourquoi, derrière l'apparent échec prédictif de Clairaut se cache en réalité un succès considérable. Mais on ne peut rendre compte de ce succès que si l'on considère que ce qui fait un succès prédictif ce n'est pas seulement son adéquation aux données : c'est aussi et surtout sa *fécondité*. À l'inverse, nous allons vous que certaines prédictions qui semblent réussies ne constituent pas pour autant des succès

⁸⁰TOURNÈS, "L'intégration approchée des équations différentielles ordinaires (1671-1914)", p. 322.

⁸¹À D'Alembert, qui critiquait cette procédure, Clairaut répondit ainsi avec une certaine ironie : « puisque M. Dalember ne se sent pas assez de patience pour faire les calculs nécessaires à la construction de bonnes tables, qu'il veuille bien laisser tranquilles ceux qui ont le courage de l'entreprendre », Alexis CLAIRAUT, "Lettre de M. Clairaut à Messieurs les Auteurs du Journal des Sçavants", *Journal des savants* (1761). Cette pique montre que ce qu'a prouvé Clairaut, c'est que la méthode des perturbations ne demande que des efforts et de la patience, mais ne présente aucune difficulté mathématique insurmontable.

pouvant confirmer l'hypothèse dont elles sont tirées, parce qu'elles n'ont aucune fécondité.

7.5.4 Un échec prédictif paradoxal : les prédictions anthropiques

Le terme de « prédition anthropique » désigne les prédictions réalisées, à partir des années 2000, sur le fondement de l'hypothèse dite du « multivers ».

La définition la plus générale du *multivers* est un « ensemble d'Univers » ou « méta-Univers », auquel appartiendrait notre Univers observable. Les Univers qui composent ce multivers n'ont pas les mêmes conditions initiales, ni les mêmes constantes, ni, dans certaines versions de l'hypothèse du multivers, les mêmes lois⁸².

Ces prédictions fondées sur l'hypothèse du multivers sont dites « anthropiques » parce qu'elles répondent à un problème précis : celui du principe anthropique. Ce principe — fort mal nommé au demeurant — repose sur l'observation que notre Univers semble particulièrement bien adapté à l'apparition de la complexité, de la vie en général et de la vie humaine en particulier. En effet, la valeur de plusieurs constantes fondamentales de la physique et conditions initiales de l'Univers doivent être fixées très précisément pour qu'elles puissent permettre l'apparition de molécules complexes et donc de la vie sous la forme que nous connaissons.

Par exemple, la constante cosmologique Λ (voir chapitre 3) agit comme une force opposée à la gravitation. Si elle était plus faible ou négative, l'Univers se serait effondré avant qu'apparaissent les grandes structures galactiques et donc la vie. Si elle était plus forte, l'expansion de l'Univers serait telle qu'elle empêcherait la gravitation de regrouper la matière en

⁸²De plus, les versions de l'hypothèse du multivers peuvent varier sur le rapport qu'entretiennent les Univers du multivers : ces Univers peuvent être causalement connectés ou non connectés, ils peuvent succéder dans le temps ou coexister, etc. Le statut même de la proposition selon laquelle il existe un multivers ne fait pas l'unanimité : si pour certains il s'agit d'une *théorie* pour d'autres il s'agit d'une *conséquence* de théories déjà existantes, voire d'une *prédiction* de ces théories. C'est pourquoi, afin de rester le plus neutre possible, j'utilise ici l'expression « *hypothèse* du multivers », qui ne prend pas position dans ce débat.

grandes structures galactiques. La constante cosmologique doit donc être *finement ajustée* pour permettre l'apparition de la vie.

Parmi ces constantes et conditions initiales finement ajustées pour permettre l'apparition d'observateurs dans l'Univers on trouve Λ , mais aussi, par exemple le rapport N entre la force électromagnétique et gravitationnelle ou la densité de matière de l'Univers ρ_m doit être de 0.3^{83}

Pour expliquer ce principe anthropique certains cosmologistes (dont Aurélien Barrau, S. Weinberg ou L. Susskind) ont développé l'hypothèse de l'existence réelle d'un multivers : dans chaque région du multivers on trouve des constantes de la physique différentes, mais les êtres vivants sont apparus que dans les régions du multivers qui se trouvent être adaptées à la vie intelligente, régions dont fait partie notre Univers observable.

Ainsi, parmi tous les Univers qui composent le multivers, certains seraient adaptés à la vie et d'autres non : nous nous trouverions seulement dans un de ces Univers adaptés à l'apparition d'êtres intelligents tels que nous. C'est pourquoi nous aurions l'impression de nous trouver dans un Univers particulièrement bien adapté à la vie intelligente, comme les poissons qui ont été sélectionnés pour vivre en eaux profondes doivent avoir l'impression que le fond de l'océan est particulièrement bien adapté à leur mode de vie.

En 2000, S. Weinberg a proposé une méthode pour prédire la valeur d'une des constantes de la physique à partir de cette hypothèse : la constante cosmologique Λ^{84} . Dans la décennie qui suivit, cette méthode a été utilisée par divers cosmologistes, dont Alexander Vilenkin, qui calcula que la probabilité d'observation d'une valeur Λ est maximale pour $\Lambda \simeq 10\Lambda^*$ (où Λ^* est la valeur de la constante cosmologique observée dans notre Univers). Cette prédiction peut paraître imprécise, mais la valeur observée est dans l'intervalle de confiance de 95%⁸⁵. Un tel intervalle de

⁸³Martin REES, *Just Six Numbers : The Deep Forces that Shape the Universe*, New York, Basic Books, 1999. Le cosmologiste Martin Rees ajoute trois autres constantes à cette liste : E , l'intensité de la liaison électroforte, Q les anisotropies à l'origine des structures, D , le nombre de dimensions spatiales. Pour une liste encore plus étendue, voir Craig HOGAN, "Why the universe is just so", *Reviews of Modern Physics* 72.4 (2000), p. 1149.

⁸⁴Steven WEINBERG, "A priori probability distribution of the cosmological constant", *Physical Review D* 61.10 (2000), p. 103505.

⁸⁵L'intervalle de confiance de 95% ne signifie pas qu'il y a une probabilité de 0.95

confiance est celui utilisé dans la plupart des publications en cosmologie. On peut donc considérer que, sauf erreur de calcul, l'hypothèse du multivers permet de prédire avec succès la valeur de la constante cosmologique mesurée dans notre Univers, dans les limites d'erreur acceptées en cosmologie.

Et pourtant, l'hypothèse du multivers, bien loin d'avoir été acceptée par l'ensemble de la communauté des cosmologistes, fait toujours débat, puisque même son statut d'hypothèse scientifique est controversé au point que certains scientifiques et philosophes parlent de « crise de la prédictibilité »⁸⁶.

La prédiction anthropique de Λ représente donc le cas inverse de celui de la prédiction du retour de la comète de Halley par Clairaut : bien que les résultats prédits soient en accord avec les observations, cette prédiction n'est pas considérée comme un succès prédictif.

À nouveau, pour résoudre cet apparent paradoxe, il ne faut pas examiner que le résultat de la prédiction, mais aussi les détails de sa dérivation. Le raisonnement des prédictions anthropiques est le suivant : si nous nous trouvons bien dans un multivers, alors la probabilité d'observer une certaine valeur Λ_0 de la constante cosmologique dépend de deux facteurs. Le premier est la distribution de probabilité *a priori* de Λ_0 , c'est-à-dire la probabilité de tirer au sort, parmi tous les Univers du multivers, un Univers dans lequel la constante cosmologique vaut Λ_0 . Le second, est le nombre d'observateurs dans chacun de ces multivers en fonction de Λ_0 . En effet, dans un Univers où n'existe aucun observateur, il n'y a aucune probabilité que quelqu'un mesure la valeur de la constante cosmologique ; mais plus un Univers admet d'observateurs, plus la probabilité que quelqu'un observe la valeur constante cosmologique de cet Univers augmente. Ainsi, la probabilité qu'une certaine valeur Λ_0 de la constante cosmologique soit réellement observée ($p(\Lambda_0|obs)$) est le produit de la probabilité *a priori* $p(\Lambda_0)$ d'avoir un Univers dans lequel $\Lambda = \Lambda_0$ et de $n_{obs}(\Lambda_0)$, le

de trouver la valeur de Λ dans cet intervalle, mais que cet intervalle est une estimation correcte dans 95% des cas si l'on répète plusieurs fois l'estimation de Λ .

⁸⁶Chris SMEENK, "Predictability crisis in early universe cosmology", *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* (2013), p. 11.

nombre d'observateurs qui apparaissent dans l'Univers où $\Lambda = \Lambda_0$:

$$p(\Lambda_0|obs) = p(\Lambda_0) \cdot n_{obs}(\Lambda_0) \quad (7.2)$$

Comme le fait remarquer le cosmologiste A. Barrau, l'évaluation de la valeur de ces deux facteurs pose deux problèmes⁸⁷ :

- Le problème dit de la *mesure*, c'est-à-dire de l'évaluation de la probabilité *a priori* de Λ .
- Le problème dit du *facteur de sélection*, c'est-à-dire de l'évaluation du nombre d'observateurs dans un Univers pour chaque valeur de Λ .

Pour pouvoir répondre au problème de la mesure, il faudrait avoir une théorie qui explique comment Λ est susceptible de varier dans le multivers, ou, pour le dire autrement, de la proportion d'Univers pour chaque valeur de Λ . On ne dispose pas, actuellement, d'une telle théorie, même à l'état de simple ébauche.

Pour pouvoir répondre au problème du facteur de sélection, il faudrait être capable de montrer par quel mécanisme la valeur de Λ affecte l'apparition de molécules complexes, puis de la vie et de la conscience. Or la simple question de l'apparition de la vie sur Terre, qui relève de l'exobiologie, est loin d'être réglée : les facteurs qui interviennent dans un tel phénomène ne sont donc pas élucidés.

Pour mener à bien la prédiction anthropique de Λ , A. Vilenkin dut donc utiliser des hypothèses auxiliaires simplificatrices. La première est que l'on peut ramener la probabilité *a priori* de Λ à une constante :

Supposez qu'un paramètre X varie dans l'intervalle ΔX et est caractérisé par une certaine distribution de probabilité *a priori* $p(X)$. Supposez en outre que X affecte le nombre d'observateurs de telle manière que ce nombre n'est pas négligeable uniquement dans un petit intervalle $\Delta X_{obs} \ll \Delta X$.

⁸⁷Pour une idée de la manière dont procèdent les cosmologistes, voir Aurelien BARRAU, "Physics in the multiverse : an introductory review", *CERN Courier* 47.10 (2007).

On peut alors s'attendre à ce que la fonction $p(X)$ ayant un grand domaine de variation soit presque constante dans le petit intervalle ΔX_{obs} ⁸⁸.

On peut donc ramener l'équation (7.2) à :

$$p(\Lambda_0|obs) \propto n_{obs}(\Lambda_0) \quad (7.3)$$

La seconde hypothèse simplificatrice concerne le facteur de sélection. La constante cosmologique n'a d'effet qu'à grande échelle, puisque ses effets ne se font sentir que sur l'expansion de l'Univers dans son ensemble et non au niveau microscopique ou même galactique. On peut donc considérer que la valeur de Λ n'affecte l'apparition d'observateurs dans l'Univers que parce que si elle est trop forte l'expansion de l'Univers est trop rapide pour que les galaxies aient le temps de se former et inversement si elle est trop faible ou négative, l'Univers se contracte et les galaxies n'ont pas non plus le temps de se former. Autrement dit, la constante cosmologique n'a pas d'effet sur la physique nucléaire ou sur la chimie organique : ses effets anthropiques consistent uniquement en son impact sur le nombre de galaxies qui apparaissent dans un Univers.

Bien sûr, nous n'avons aucune idée de comment calculer n_{obs} , mais ce qui vient à notre secours est que la valeur de Λ n'affecte pas directement la physique et la chimie de la vie. En première approximation, on peut supposer que $n_{obs}(\Lambda_0)$ est simplement proportionnel à la fraction de matière f agrégée dans les galaxies géantes comme la nôtre (avec une masse $M \geq M_G = 10^{12} M_{Soleil}$) :

$$n_{obs}(\Lambda) \propto f(M_G, \Lambda_0)$$

L'idée est qu'il y a un certain nombre d'étoiles par unité de masse dans un galaxie et un certain nombre d'observateurs

⁸⁸Alexander VILENKIN, "Anthropic predictions : the case of the cosmological constant", *Universe or Multiverse ?*, sous la dir. de Bernard CARR, Cambridge, Cambridge University Press, 2007, p. 163–179, p. 169.

par étoiles.⁸⁹

On rend ainsi calculable la probabilité de la valeur de la constante cosmologique à partir d'une grandeur que l'on peut évaluer :

$$p(p(\Lambda_0|obs)) \propto f(M_G, \Lambda_0) \quad (7.4)$$

C'est ainsi que A. Vilenkin arriva à la prédiction mentionnée plus haut selon laquelle la valeur de la constante cosmologique qui a le plus le chance d'être observée dans le multivers vaut dix fois celle mesurée dans notre Univers⁹⁰.

Remarquons d'abord qu'il n'y a rien, dans la méthode du raisonnement prédictif cité ci-dessus, qui permette de qualifier cette prédiction anthropique de « pseudo-prédiction ». Les calculs de A. Vilenkin permettent de fixer une variable sans la mesurer : ils constituent bien une prédiction.

L'utilisation d'hypothèses simplificatrices n'est pas non plus *en soi* une raison de considérer la prédiction anthropique de A. Vilenkin comme un échec. Comme on l'a vu dans le chapitre 1, de telles hypothèses auxiliaires sont utilisées dans *toute* prédiction guidée par des lois ou par des modèles. Même la prédiction de Clairaut, qui cherchait à prendre en compte tous les facteurs perturbant l'orbite de la comète de Halley, avait dû utiliser plusieurs hypothèses simplificatrices, en considérant notamment que la comète de Halley se déplaçait dans le plan de l'écliptique alors que ce n'est pas le cas.

En revanche, le *contenu* des hypothèses auxiliaires utilisées dans le raisonnement prédictif d'A. Vilenkin diffère de celle des hypothèses auxiliaires utilisées dans le raisonnement prédictif de Clairaut :

- La première hypothèse simplificatrice utilisée par A. Vilenkin est que l'intervalle des valeurs de Λ qui permettent l'apparition d'obser-

⁸⁹VILENKIN, "Anthropic predictions : the case of the cosmological constant", p. 168. J'ai adapté les notations à celles utilisées précédemment dans ce chapitre.

⁹⁰Pour les détails de ce calcul et son utilisation très particulière des probabilités conditionnelles, voir Julien GRAIN et Gauvain LÉCONTE, "Expliquer et prédire dans le multivers", *L'Exercice de la pluralité des mondes*, sous la dir. de Sylvie NONY et Alain SARRIEAU, Paris, Adapt Éditions, 2017, p. 135–148.

vateurs est suffisamment petit pour que l'on puisse substituer une constante à $p(\Lambda_0)$. Cette hypothèse auxiliaire peut sembler plausible. Mais il semblerait peu plausible que *toutes* les constantes de la physique se comportent ainsi dans le multivers et donc que l'on puisse étendre cette hypothèse à d'autres de ces constantes.

- La deuxième hypothèse simplificatrice utilisée par A. Vilenkin est que la constante cosmologique n'agit sur l'apparition d'observateurs que *via* l'agrégation de matière dans de grandes structures galactiques et n'a pas d'impact sur la chimie du vivant. C'est ce qui lui permet de substituer $f(M_G, \Lambda_0)$ à $n_{obs}(\Lambda_0)$. Cette hypothèse ne vaut que pour la prédiction anthropique de la constante cosmologique : d'autres constantes de la physique, comme N (le rapport entre la force électromagnétique et gravitationnelle) ou E (l'intensité de la liaison électroforte) influencent directement la chimie du vivant.

Ainsi, alors que les hypothèses auxiliaires utilisées par Clairaut n'empêchent pas l'application de sa méthode à de nouveaux cas, celles utilisées par A. Vilenkin sont spécifiques au cas de la constante cosmologique. Il fait lui-même remarquer que « l'extension [de sa méthode] à des paramètres comme la masse ou la charge de l'électron, qui affectent les processus vitaux, repose sur des bases beaucoup plus fragiles »⁹¹. Le raisonnement prédictif qui mène à fixer la valeur de la constante cosmologique à partir de l'hypothèse du multivers n'est donc pas *fécond* parce qu'il n'est pas réutilisable pour réaliser de nouvelles prédictions anthropiques.

Il n'y a donc aucun paradoxe à considérer les prédictions anthropiques comme des échecs alors même que leur résultat est conformes aux observations, à la condition d'admettre que les prédictions qui comptent dans la confirmation d'une hypothèse sont des prédictions *fécondes* et que ce sont elles qui constituent des succès prédictifs.

En conclusion, on peut formuler la conception du choix des hypothèses à laquelle on aboutit ici en faisant un parallèle avec la théorie de la projection de Goodman : certaines prédictions sont des succès parce que leur raisonnement prédictif révèle que les hypothèses sur lesquelles elles

⁹¹VILENKIN, "Anthropic predictions : the case of the cosmological constant", p. 176.

sont fondées sont projectibles, tandis que d'autres mènent à un résultat correct mais leur raisonnement prédictif ne permet pas de s'assurer de la projectibilité des hypothèses sur lesquelles elles sont fondées. Goodman avait raison d'insister sur le fait que pour juger de la projectibilité d'une hypothèse il faut prendre en compte les résultats d'autres prédictions, à la fois celles déjà réalisées ou celles qui pourront être réalisées dans l'avenir en se fondant sur la même méthode⁹². Voilà pourquoi il est nécessaire d'étudier les succès prédictifs d'une théorie sur le long terme — c'est-à-dire d'étudier des séries de prédictions et non des prédictions isolées — pour juger de leur fécondité.

7.6 Conclusion du chapitre : le rôle des prédictions dans la théorie de la confirmation

Résumons ce que nous avons vu jusqu'à présent pour répondre aux deux questions qui ont ouvert ce chapitre.

Quelles sont les prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation des hypothèses ? Ce sont les prédictions qui permettent de s'assurer que l'on a évité un cas de tricherie, c'est-à-dire le sacrifice d'une vertu épistémique au profit d'une autre. Ces prédictions sont typiquement des prédictions *heuristiques*, c'est-à-dire qui portent sur des phénomènes qui n'ont pas été utilisés dans le raisonnement prédictif. Ces prédictions permettent de s'assurer de la *précision prédictive* d'une hypothèse.

Mais un des acquis de ce chapitre est de révéler que la question de la confirmation des hypothèses doit être distinguée de la question de la

⁹²La principale différence entre la théorie de la capacité prédictive que j'ai développé ici et la théorie de la projection de Goodman, est que Goodman fonde la projectibilité sur l'implantation des *prédicats*, faisant ainsi de la théorie de la confirmation une question de langage, tandis que je considère que la projectibilité d'une théorie est essentiellement une question d'*inférence*, puisque l'on juge de la capacité prédictive d'une théorie sur la méthode employée pour mener à bien un raisonnement prédictif. Autrement dit, pour Goodman on juge de la projectibilité d'un prédicat en examinant les énoncés dans lesquels il apparaît qui ont été projetés par le passé. Pour moi, on juge de la projectibilité d'une méthode examinant les raisonnements prédictifs qu'elle a permis de réaliser par le passé et qu'elle pourrait suggérer dans le futur.

confirmation des théories. En effet, une théorie est un ensemble d'hypothèses, utilisées en commun pour dériver des prédictions. Lorsque l'on parle de confirmation de théories, on doit donc prendre en compte le problème de Duhem : il est toujours possible de trouver un ensemble d'hypothèses auxiliaires qui permette à une théorie de prédire un phénomène donné.

Il faut donc poser une nouvelle question : quelles sont les prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation des théories ? Ce sont les prédictions qui permettent de s'assurer de la *diversité prédictive* d'une théorie. Ces prédictions sont typiquement des prédictions *théoriques*, c'est-à-dire qui portent sur des phénomènes, lois empiriques ou lois théoriques qui ne sont pas expliqués par d'autres théories rivales. Ces prédictions permettent de s'assurer que l'on n'a pas utilisé d'hypothèses auxiliaires peu plausibles et donc que l'extension d'une théorie à de nouvelles régions de l'expérience est féconde.

Ces deux types de prédictions permettent de s'assurer de la précision prédictive des hypothèses et de la diversité prédictive d'une théorie. Ces vertus épistémiques constituent ce que l'on a appelé la *capacité prédictive* des théories. Si l'on considère que la découverte et la prédictions de nouveaux phénomènes est l'objectif principal de l'activité scientifique (mais pas forcément le seul objectif), le développement de la capacité prédictive d'une théorie est ce qui, en droit, doit gouverner le choix des hypothèses et théories scientifiques.

On peut donc répondre à la seconde question que traite ce chapitre : quel rôle jouent ces prédictions dans la confirmation des hypothèses et des théories ? Elles jouent le rôle d'indicatrices : elles permettent aux scientifiques de juger de la fécondité des hypothèses et des théories, c'est-à-dire du développement possible de leur capacité prédictive. Dans ce jugement interviennent plusieurs facteurs, comme la réussite passée de cette théorie, la méthode employée dans les raisonnements prédictifs et les liens que permet de tisser cette prédiction avec d'autres domaines. En aucun cas on ne peut être certain que la capacité prédictive d'une théorie continuera de croître : mais une prédiction féconde permet d'être certain qu'aucune tricherie ne l'en empêche.

Cette réponse peut sembler décevante : les prédictions ne serviraient donc qu'à manifester certaines vertus épistémiques, vertus qui resteraient pourtant toujours opaques puisque leur évaluation ne peut être précise et univoque. On ne peut donc pas créer un algorithme de sélection des théories qui fournirait un score exact à chacune d'entre elles pour les comparer objectivement. Il est au contraire nécessaire, pour chaque cas de confirmation, d'entrer dans les détails du contexte et des raisonnements prédictifs pour évaluer si une prédiction est féconde ou non.

Cependant, cette déception est le prix à payer pour pouvoir appliquer la théorie de la confirmation à des cas réels de choix d'hypothèses, trouver les règles rationnelles sous-jacentes à ces choix que font les scientifiques et ainsi espérer que la théorie de la confirmation pourra les aider à régler certains problèmes méthodologiques.

Conclusion de la troisième partie : choix des hypothèses et changement scientifique

L'objectif de cette thèse est de savoir si ce sont les mêmes prédictions qui jouent un rôle dans le contexte de la confirmation et du changement scientifique, pour examiner ensuite si elles peuvent soutenir l'argument du miracle en faveur du réalisme scientifique.

On peut désormais remplir la première partie de ce cahier des charges en montrant que le rôle des prédictions dans l'évolution historique des sciences et leur rôle dans les procédures de confirmation convergent. À la fin de la deuxième partie de cette thèse, j'ai insisté sur l'importance de prendre en compte non pas une prédiction isolée mais le développement de la capacité prédictive d'une théorie. De même, comme on l'a vu dans cette partie, si l'on soutient que certaines prédictions isolées ont un rôle important dans la confirmation des théories, on est confronté au problème soulevé par Keynes (voir section 6.2.1) : il n'y a aucune raison, dans le contexte de la confirmation, d'attribuer plus d'importance aux preuves prédites qu'aux preuves déjà connues ou utilisées dans la formulation d'une hypothèse. Si l'on peut donner une place spécifique aux prédictions dans la confirmation d'une hypothèse ou d'une théorie, c'est uniquement parce qu'elle renforce notre croyance que cette hypothèse ou théorie est dotée de vertus épistémiques qui lui ont permis et lui permettront d'améliorer sa précision et d'étendre son domaine d'application sans sacrifier sa simplicité ou la plausibilité de ses hypothèses auxiliaires.

Il est possible de construire une notion de capacité prédictive des théories fondée sur ces vertus épistémiques (voir section 7.4). Même si la capacité prédictive d'une théorie est *opaque* pour les contemporains d'une théorie, parce que l'on ne peut pas mesurer cette capacité *a priori*, elle n'en reste pas moins une valeur importante dans le choix rationnel des hypothèses. C'est même parce que la capacité prédictive d'une théorie est opaque que les prédictions et les raisonnements prédictifs jouent un rôle important dans les controverses sur l'acceptation ou le rejet d'une nouvelle hypothèse : dans la plupart des cas, c'est à partir de ces pré-

dictions et de ces raisonnements prédictifs que les scientifiques peuvent évaluer si une nouvelle hypothèse a les vertus épistémiques nécessaires pour être *féconde*.

On peut donc affirmer que les mêmes succès prédictifs jouent un rôle dans le changement scientifique et en théorie de la confirmation. La portée de ces succès n'est pas seulement d'être impressionnants et d'influencer psychologiquement les scientifiques : ils ont aussi valeur de preuve et il est légitime de s'y fier pour faire le tri parmi les hypothèses.

Cependant, rien ne permet de supposer pour l'instant que ces succès sont suffisants pour nous assurer de la *vérité* des théories qui les ont engendrés. Au contraire, il semblerait d'une part que des théories aujourd'hui considérées comme fausses aient connu de tels succès prédictifs et d'autre part que les succès des théories tenues pour vraies soient dus à des hypothèses auxiliaires dont la vérité semble suspecte. C'est pourquoi la dernière partie de cette thèse examine si ces succès prédictifs ont les caractéristiques nécessaires pour prouver que la réussite prédictive des théories scientifique ne peut s'expliquer que par la vérité de ces théories.

Quatrième partie

Nouvelles prédictions et réalisme scientifique

Introduction de la quatrième partie : le problème de la vérité des théories scientifiques

L'objet de cette dernière partie est la place des prédictions dans les arguments en faveur du réalisme scientifique, c'est-à-dire la thèse selon laquelle nos théories les mieux confirmées sont vraies ou approximativement vraies.

Si l'on ne distingue pas la *confirmation* et la *vérité* d'une théorie, cette thèse peut sembler tautologique : les théories les mieux confirmées sont par définition les plus vraies, puisque ce sont celles qui ont été sélectionnées pour correspondre le mieux possible aux données empiriques. Dans ce cas, la théorie du big bang est vraie pour la simple et bonne raison qu'elle a passé avec succès tous les tests où elle a été confrontée aux données d'observations, en particulier les tests prédictifs.

Cependant, on peut distinguer la vérité d'une théorie de sa confirmation. En effet, si l'on conçoit la vérité comme un rapport d'adéquation à la réalité, alors une théorie vraie est celle dont les postulats décrivent fidèlement les entités et les structures des réalités qu'elle traite. De plus, si l'on suppose que ces réalités ont une existence indépendante de nos observations, mesures et hypothèses, alors elles ne changent pas selon l'état de notre connaissance. Affirmer qu'une théorie est vraie ou partiellement vraie, c'est ainsi affirmer que certaines de ses hypothèses sont *définitives*, parce qu'elles décrivent des structures, des entités ou des événements réels existant dans la nature. Ces hypothèses vraies peuvent être reformulées, modifiées ou améliorées, mais ne peuvent pas être purement et simplement éliminées lorsque la théorie à laquelle elles appartiennent est remplacée par une nouvelle théorie lors d'une révolution scientifique.

Ainsi, dire que la théorie du big bang est *vraie*, ce n'est plus seulement dire que l'on a des preuves suffisantes pour accepter cette théorie : c'est aussi affirmer que l'univers a *réellement* connu une phase dense et chaude de nucléosynthèse et que si l'on rejette la théorie du big bang pour une nouvelle théorie cosmologique, il faudra qu'elle conserve une hypothèse qui rende compte de la réalité de cet événement.

Définir une position réaliste n'implique donc pas nécessairement que

l'on distingue des prédicats ou des entités observables et non observables, mais que l'on puisse circonscrire précisément les postulats des théories confirmées qui sont susceptibles de renvoyer à la réalité et de survivre aux révolutions scientifiques. Cette quatrième partie s'intéresse au rôle que de nombreuses argumentations réalistes donnent aux *nouvelles prédictions* pour soutenir qu'il existe de tels postulats et pour les identifier.

Comme on l'a expliqué dans l'introduction de cette thèse, le principal argument en faveur du réalisme scientifique faisant intervenir les prédictions est l'argument dit du *miracle*. Cet argument consiste à prouver que la seule explication des succès prédictifs de nos théories les mieux confirmées qui ne fasse pas de ces succès des miracles est que ces théories sont vraies ou partiellement vraies.

Dans le premier chapitre de cette partie, j'examine si les prédictions peuvent avoir ce rôle de critère entre théories vraies et fausses. L'objectif est de savoir si les succès prédictifs peuvent faire de l'argument du miracle une *preuve* de la vérité des théories scientifiques et donc de déterminer la portée de cet argument.

Dans le second chapitre de cette partie, j'examine les liens qui existent entre prédiction et expérimentation pour montrer que les prédictions ont un rôle dans un autre argument en faveur du réalisme scientifique, argument selon lequel on peut être assuré de l'existence des entités que l'on est capable de manipuler pour réaliser des expériences scientifiques.

Chapitre 8

Quelques problèmes avec l'argument du miracle fondé sur les succès prédictifs

Le débat sur le réalisme scientifique est le théâtre de la confrontation entre deux intuitions. La première est que si l'on n'admet pas qu'une théorie confirmée par des succès impressionnants est vraie, alors ses succès prédictifs semblent n'être que de miraculeuses coïncidences entre cette théorie et la réalité. La seconde est que, si l'on jette un regard sur l'histoire des sciences, on peut y contempler un cimetière de théories aujourd'hui considérées comme fausses qui, pourtant, étaient célébrées par leurs contemporains pour leurs succès (comme par exemple la théorie de la gravitation de Newton ou l'optique de Fresnel). Comme on l'a vu dans l'introduction de cette thèse, la première intuition est celle sous-jacente à l'*argument du miracle*, tandis que la seconde est au cœur de l'*induction pessimiste*, d'après laquelle si les théories passées ont connu des succès mais ont été rejetées comme fausses, il est fort probable que nos théories actuelles, si confirmées soient-elles, connaissent le même sort.

Ce débat est en continuité avec les problèmes de théorie de la confirmation examinés dans la partie précédente de cette thèse. En effet, de nombreux partisans du réalisme scientifique¹ considèrent que l'on peut

¹Voir notamment MUSGRAVE, "The Ultimate argument for scientific realism", WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", ou, plus récemment,

affaiblir l'induction pessimiste en ne prenant en compte que les théories ayant connu un type de confirmation précis : les succès prédictifs.

Cependant, il ne s'en suit pas pour autant que ce sont les mêmes prédictions qui jouent un rôle dans la *confirmation* des théories et dans l'argument du miracle. J'appelle *nouvelles prédictions* (pour traduire l'anglais *novel predictions*) ces succès prédictifs si singuliers qu'ils ne semblent pouvoir être expliqués que par la vérité des hypothèses qui en sont au fondement. Un des exemples qui revient le plus souvent dans les argumentations réalistes, au point qu'il mérite le titre de *paradigme* des nouvelles prédictions, est la prédiction suivante, réalisée en 1818 à partir de la théorie ondulatoire de la lumière de Fresnel : au centre de l'ombre géométrique d'un disque opaque devrait apparaître un point lumineux. Pour John Worrall par exemple, cette prédiction n'a eu qu'un rôle mineur dans la confirmation et l'acceptation de la théorie de Fresnel² et pourtant, lorsqu'il énumère les succès prédictifs qui sont à même de soutenir sa conception du réalisme scientifique (le réalisme structural), c'est cette prédiction qu'il cite :

Le type de succès qui semble adapté à l'intuition sous-jacente à l'argument du miracle est un cas bien plus fort, bien plus frappant de succès prédictif. Dans ce cas, ce n'est pas juste une nouvelle instance d'une généralisation empirique déjà connue qui est tiré d'une théorie : c'est une généralisation empirique totalement nouvelle et qui confirme expérimentalement. La prédiction d'une planète inconnue à partir de la théorie de Newton et la prédiction d'un point lumineux au centre de l'ombre d'un disque opaque par la théorie de la réfraction de Fresnel sont des exemples de tels succès³.

Le premier objectif de ce chapitre est ainsi d'examiner quel type de succès prédictif est adapté à l'argument du miracle.

SAATSI, "Historical Inductions, Old and New".

²Voir John WORRALL, "Fresnel, Poisson and the white spot : the role of successful predictions in the acceptance of scientific theories", *The Uses of Experiment, Studies in the natural sciences*, sous la dir. de David GOODING, Trevor PINCH et Simon SCHAFFER, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 135–157.

³WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds ?", p. 114.

Le second objectif est de voir jusqu'où ces succès prédictifs permettent de pousser l'argument du miracle : peuvent-ils fournir une *preuve* de la vérité des théories ou ne font-ils qu'alimenter une *intuition* que l'on peut clarifier mais pas justifier ? Peuvent-ils nous permettre de trier, parmi les postulats d'une théorie, ceux qui sont vrais et qui seront retenus dans les théories postérieures, de ceux qui sont faux et qui pourront disparaître lors d'une prochaine révolution scientifique ?

Dans la première section de ce chapitre, je reviens sur trois des premières versions de l'argument du miracle, afin de montrer qu'il peut être formulé comme des arguments différents.

Dans la deuxième section, j'examine les définitions des nouvelles prédictions qui ont été proposées pour formuler cet argument comme une inférence à la meilleure explication et je montre que cette version de l'argument du miracle doit affronter un problème lié à la structure logique des prédictions guidées par des lois ou des modèles : la présence d'embarrassantes idéalizations.

Dans la troisième section, je montre que les caractéristiques des succès prédictifs permettant de confirmer une théorie impliquent que l'on ne peut faire de l'argument du miracle une *preuve* de l'indispensabilité et donc de la vérité de certains postulats de nos théories.

Enfin, dans la quatrième section, je propose un argument fondé, non pas sur le passé de la science, mais sur son avenir, pour montrer que les succès prédictifs ne nous autorisent pas à circonscrire un ensemble d'éléments de nos théories actuelles que l'on pourrait considérer comme définitifs.

8.1 Trois origines et versions de l'argument du miracle

Faire une histoire du réalisme scientifique et des arguments en faveur de cette position serait une entreprise qui excèderait le cadre de cette thèse. Mais on peut en revanche remonter à l'origine de l'argument selon lequel les succès prédictifs sont un gage de vérité et ainsi en identifier les différentes formulations possibles.

8.1.1 Whewell : l'argument du miracle comme inférence à la seule explication

C'est Whewell qui, le premier, donna un tel rôle aux prédictions. Dans le *Novum Organum Renovatum*, en 1858, Whewell soutient en effet que « lorsque l'hypothèse, *d'elle-même et sans aucun ajustement à cette fin*, nous donne la règle et la raison d'une classe de phénomènes *qui n'étaient pas envisagés dans sa construction*, alors nous avons un *critère de sa réalité* qui n'a jamais été attribué à des hypothèses fausses »⁴.

Whewell confère aux prédictions heuristiquement nouvelles de faits d'un genre différent et aux prédictions de faits d'un même genre la capacité de *confirmer* les hypothèses dont elles sont dérivées. Mais seules les premières sont en mesure de nous assurer de la *vérité* de ces hypothèses d'après lui. La raison en est que ces prédictions constituent un cas de *consilience des inductions*, expression employée par Whewell pour indiquer qu'une hypothèse permet de subsumer d'autres hypothèses qui rendent compte de domaines différents de l'expérience (voir section 6.1.2). Le caractère inattendu de la consilience des inductions ne peut s'expliquer, d'après Whewell, que par la vérité des hypothèses induites : « que des règles, s'élançant ainsi de régions éloignées et sans rapport, atterrissent au même point, ne peut provenir que du fait que ce point est là où la vérité réside »⁵.

La forme que prend l'argument de Whewell est une *inférence à la meilleure explication*, ou, pour être plus précis, une *inférence à la seule explication* : la correspondance entre une hypothèse et la réalité est la seule explication possible du succès de la consilience des inductions. Whewell n'emploie pas le terme d'inférence à la meilleure explication, puisque cette inférence n'a été théorisée qu'après sa mort par Peirce sous le nom d'*abduction* ou d'*inférence hypothétique* (voir chapitre 6, section 6.1.5). Elle consiste, à partir d'un ensemble d'effets surprenants, à faire l'hypothèse d'une cause qui, si elle était vraie, expliquerait ces effets. Dans le cas qui nous intéresse ici :

⁴WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §11, p. 90. Je souligne.

⁵WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §11, p. 88.

La prédiction P tirée de la théorie T est un succès prédictif étonnant.

Si T était vraie, cela expliquerait le succès prédictif P .

Donc T est susceptible d'être vraie.

C'est bien cette inférence qui est à l'œuvre dans l'argument de Whewell puisque celui-ci peut être reformulé ainsi, en filant la métaphore spatiale utilisée par Whewell dans la citation ci-dessus : ce serait une coïncidence difficilement explicable si l'on était capable de retrouver son chemin depuis deux lieux différents en utilisant une carte fausse, c'est-à-dire qui ne représenterait pas adéquatement la région où l'on se trouve.

Whewell est ainsi le premier qui ait formulé l'argument du miracle fondé sur les succès prédictifs comme une inférence à la meilleure explication et indiqué quel type de prédictions est adapté à cet argument.

Cependant, on ne peut que constater que Whewell plaçait en l'évolution des sciences des espoirs aujourd'hui déçus. Son affirmation selon laquelle « aucun exemple ne peut être fourni dans toute l'histoire des sciences, dans lequel cette consilience des inductions a témoigné en faveur d'une hypothèse dont on s'est par la suite rendu compte qu'elle était fausse »⁶ semble aujourd'hui réfutée : de nombreuses hypothèses ayant été confirmées par ce type de prédictions ne sont plus considérées comme vraies — à commencer par la théorie de la gravitation de Newton ou l'optique ondulatoire de Fresnel que Whewell prend comme exemples. Cet optimisme de Whewell rend son réalisme vulnérable à l'induction pessimiste.

8.1.2 Poincaré : l'argument du miracle comme argument d'indispensabilité

Avec un demi-siècle de recul supplémentaire, Henri Poincaré (1854–1912), reprend et reformule l'argument du miracle comme un *argument d'indispensabilité*. Dans le dixième chapitre de la *La Science et l'Hypothèse* en

⁶WHEWELL, *Novum organon renovatum*, II, ch.5, §11, p. 90.

1902, il semble tirer une leçon différente et bien plus pessimiste de l'histoire des sciences que Whewell :

Les gens du monde sont frappés de voir combien les théories scientifiques sont éphémères. Après quelques années de prospérité, ils les voient successivement abandonnées ; ils voient les ruines s'accumuler sur les ruines ; ils prévoient que les théories aujourd'hui à la mode devront succomber à leur tour à bref délai et ils en concluent qu'elles sont absolument vaines. C'est ce qu'ils appellent la *faillite de la science*⁷.

Cependant, Poincaré remarque immédiatement que ce scepticisme repose sur une méprise des buts de la science. Il illustre son argument en prenant comme exemple l'optique ondulatoire de Fresnel :

Nulle théorie ne semblait plus solide que celle de Fresnel qui attribuait la lumière aux mouvements de l'éther. Cependant, on lui préfère maintenant celle de Maxwell. Cela veut-il dire que l'œuvre de Fresnel a été vaine ? Non, car le but de Fresnel n'était pas de savoir s'il y a réellement un éther, s'il est ou non formé d'atomes ; c'était de prévoir les phénomènes optiques. Or cela, la théorie de Fresnel le permet toujours , aujourd'hui aussi bien qu'avant Maxwell.⁸

Ainsi, puisque la théorie de Fresnel conserve la même capacité à prédire des phénomènes, on peut considérer, d'après Poincaré, qu'il y a donc une continuité dans l'histoire des sciences derrière un apparent chaos fait de réfutations et de révolutions : les théories sont conservées et reprises dans la mesure où elle servent à réaliser des prédictions réussies.

Poincaré s'empresse d'écarter l'interprétation instrumentaliste que l'on pourrait faire de ses affirmations : ce n'est pas seulement la capacité prédictive de la théorie de Fresnel qui a été conservée et augmentée par la théorie de Maxwell mais bien la vérité des équations de Fresnel, qui décrivent de réels rapports dans la nature :

⁷POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 173.

⁸POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 173.

Et qu'on ne dise pas que nous réduisons ainsi les théories physiques au rôle de simples recettes pratiques ; ces équations expriment des rapports et, si les équations restent vraies, c'est que ces rapports conservent leur réalité. Elles nous apprennent, après comme avant, qu'il y a tel rapport entre quelque chose et quelque autre chose ; seulement, ce quelque chose nous l'appelions autrefois *mouvement*, nous l'appelons maintenant *courant électrique*⁹.

Poincaré évite ainsi de tomber dans le scepticisme de la faillite de la science : certes, l'éther postulé par Fresnel n'est plus considéré comme vrai, mais il reste que ses équations, seules nécessaires pour dériver les prédictions ayant fait leur succès, sont toujours considérées comme vraies. Puisque l'interprétation des termes apparaissant dans ces équations peut changer, la seule vérité à laquelle puisse prétendre une théorie scientifique est dans l'adéquation à des relations existant entre les réalités naturelles :

Les rapports véritables entre ces objets réels sont la seule réalité que nous puissions atteindre et la seule condition, c'est qu'il y ait les mêmes rapports entre ces objets qu'entre les images que nous sommes forcés de mettre à leur place. Si ces rapports nous sont connus, qu'importe si nous jugeons commode de remplacer une image par une autre¹⁰.

Cette affirmation de Poincaré constitue la thèse fondamentale de ce que l'on appelle aujourd'hui le *réalisme structural épistémique* : tout ce que nous pouvons connaître de la réalité des phénomènes, ce sont leurs relations, c'est-à-dire la structure qui les organise¹¹. Savoir quelles entités constituent réellement la réalité est, pour Poincaré, une question « non seulement insoluble, elle est illusoire et dépourvue de sens »¹². C'est en re-

⁹POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 174.

¹⁰POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 174.

¹¹On distingue habituellement cette thèse du *réalisme structural ontique* d'après lequel la réalité est elle-même strictement relationnelle. Voir LADYMAN et ROSS, *Every Thing Must Go*. Cette thèse est discutée dans la conclusion de cette partie.

¹²POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 175.

prenant les arguments de Poincaré, auquel ils ont consacré un ouvrage¹³, qu'É. Zahar et J. Worrall défendent aujourd'hui le réalisme structural épistémique dans le débat sur le réalisme scientifique.

Pour bien comprendre la manière dont Poincaré reformule l'argument du miracle, il faut rappeler que dans son épistémologie, les hypothèses théoriques n'ont pour rôle que d'organiser les faits tirés de l'expérience afin de réaliser des prédictions : en classant les faits, les hypothèses théoriques les généralisent et permettent de tirer de nouvelles prédictions sur ces faits¹⁴. Lorsqu'une théorie en remplace une autre, comme par exemple lorsque la théorie de Maxwell supplanta celle de Fresnel, on retrouve toujours, d'après Poincaré, les équations de l'ancienne théorie comme cas particuliers des équations de la nouvelle théorie.

Ces équations qui ont un pouvoir prédictif se maintiennent donc d'une théorie à l'autre et c'est pour cela que, pour Poincaré, la faillite de la science cache en réalité un progrès de la capacité prédictive des théories. Ce progrès permet d'affirmer que ces équations sont des hypothèses définitives, qui sont donc susceptibles d'être vraies.

Ainsi, l'argument de Poincaré consiste à séparer, dans le contenu d'une théorie scientifique, une partie relationnelle représentée par la forme des équations et une partie auxiliaire, composée d'hypothèses sur la nature des entités qui entrent en relation. La première est susceptible d'être vraie — parce qu'elle mène à des prédictions et que la capacité prédictive d'une théorie est conservée dans la théorie qui la remplace — et la seconde n'est ni vraie ni fausse, mais uniquement commode ou non¹⁵.

Ainsi, l'argument de Poincaré en faveur de la réalité des équations n'est pas identique à celui de Whewell : Poincaré ne fait jamais remarquer qu'il serait très surprenant si ces équations étaient fausses alors qu'elles mènent à de nombreuses prédictions réussies. Il se contente de faire remarquer que ces équations sont *indispensables* à ces succès et que,

¹³Elie ZAHAR et John WORRALL, *Poincaré's Philosophy : From Conventionalism to Phenomenology*, Chicago, Open Court, 2001.

¹⁴POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 158-159.

¹⁵« Peu nous importe que l'éther existe réellement, c'est l'affaire des métaphysiciens ; l'essentiel pour nous c'est que tout se passe comme s'il existait et que cette hypothèse est commode pour l'explication des hypothèses. » POINCARÉ, *La Science et l'hypothèse*, p. 215.

par conséquent, elles seront retenues dans les théories postérieures. Elles présentent donc une permanence qui permet de les considérer comme vraies. Un tel argument fait partie de la catégorie des arguments d'indispensabilité, que l'on peut formuler ainsi :

L'élément E de la théorie T est indispensable à son succès prédictif.

Si un élément théorique est indispensable au succès prédictif d'une théorie, alors il est retenu dans les théories postérieures et est susceptible d'être vrai.

Donc E sera retenu dans les théories postérieures à T et est susceptible d'être vrai.

Les argument d'indispensabilité ne sont pas structurellement identiques aux inférences à la meilleure explication, mais ces deux versions de l'argument du miracle ne sont pas incompatibles : les arguments d'indispensabilité sont souvent utilisés pour compléter l'argument du miracle et le défendre contre l'induction pessimiste (voir section 8.3.1).

Toute position réaliste qui consiste à sélectionner certains postulats théoriques pour leur attribuer une vérité parce qu'ils sont indispensables à la réalisation de nouvelles prédictions doit faire face à d'importantes objections que je développe dans les sections 3 et 4 de ce chapitre. Mais on peut dès à présent remarquer un autre problème de l'argument formulé par Poincaré : il ne précise pas quelles prédictions permettent ainsi de s'assurer de la vérité des équations. Or, certaines prédictions sont abandonnées au cours des révolutions scientifiques. Par exemple, à partir de la théorie optique de Fresnel, on peut prédire que l'éther est un fluide *élastique*, puisqu'après le passage d'une onde lumineuse les molécules d'éther reprennent leur position initiale par rapport à l'espace absolu. Cette prédiction a pourtant disparu en même temps que l'éther et l'espace absolu au début du XX^e siècle.

La formulation de l'argument du miracle de Poincaré n'est donc pas complète parce qu'elle n'entre pas assez dans les détails des prédictions importantes pour s'assurer du caractère durable et vraie d'une hypo-

thèse théorique, c'est-à-dire ne propose pas de définition précise de ce qui compte comme une nouvelle prédiction.

8.1.3 Duhem : l'argument du miracle comme intuition

Dans le deuxième chapitre de la *La Théorie physique* Pierre Duhem expose, quelques années après Poincaré, l'idée que les prédictions nous donnent l'intuition de la vérité d'une théorie et il donne une caractérisation précise du type de prédiction qui ont ce pouvoir. Comme on l'a vu dans le chapitre 6 (voir section 6.3.1), pour Duhem comme pour Poincaré, les théories physiques n'ont pas pour objectif d'*expliquer* les lois empiriques, c'est-à-dire d'en découvrir la *cause*, mais uniquement de les classer selon un ordre plus ou moins commode.

Or, quand on peut tirer des prédictions de ces classifications, elles nous semblent « naturelles », c'est-à-dire semblent refléter l'ordre réel de la nature :

Il est une circonstance où se marque, avec une netteté particulière, notre croyance au caractère naturel d'une classification théorique; cette circonstance se présente lorsque nous demandons à la théorie de nous annoncer les résultats d'une expérience avant que cette expérience n'ait été réalisée, lorsque nous lui enjoignons cet ordre audacieux : « Prophétisez-nous »¹⁶.

Mais que demandons-nous à la théorie de nous prophétiser d'après Duhem? De nouvelles lois empiriques non encore découvertes, c'est-à-dire des phénomènes d'un genre nouveau :

Ce caractère de classification naturelle se marque surtout par la fécondité de la théorie, qui devine des lois expérimentales non encore observées et en provoque la découverte¹⁷.

¹⁶DUHEM, *La Théorie physique*, p. 37.

¹⁷DUHEM, *La Théorie physique*, p. 40.

Duhem prend deux exemples qui méritent que l'on s'y arrête. Le premier est la prédiction, à partir de la classification périodique de Mendeleïev, de l'existence de nouveaux éléments, que l'on a déjà mentionnée au chapitre 7 (section 7.1.2) et une prédiction tirée de l'optique ondulatoire de Fresnel, la prédiction du point lumineux, réalisée par Siméon Poisson (1781-1840) et testée par François Arago (1786-1853). Ainsi, à la différence de Poincaré, Duhem ne prend pas en compte l'*ensemble* des prédictions que l'on a pu tirer de la théorie de Fresnel, mais *une* prédiction précise qui correspond à la découverte d'une nouvelle loi empirique :

Des principes posés par Fresnel, Poisson, par une élégante analyse, déduisit cette conséquence étrange : si un petit écran opaque et circulaire intercepte les rayons émis par un point lumineux, il existe derrière cet écran, sur l'axe même de cet écran, des points qui non seulement sont éclairés mais qui brillent exactement comme si l'écran n'était pas interposé entre eux et la source de lumière. Un tel corollaire, si contraire, semble-t-il, aux certitudes expérimentales les plus évidentes, paraissait bien propre à faire rejeter la théorie de la diffraction proposée par Fresnel. Arago eut confiance dans le caractère naturel, partant dans la clairvoyance de cette théorie ; il tenta l'épreuve ; l'observation donna des résultats qui concordaient si absolument avec les prédictions, si peu vraisemblables, du calcul¹⁸.

Ainsi, pour Duhem, ce sont les prédictions temporellement nouvelles de phénomènes ou de lois empiriques qui comptent comme des nouvelles prédictions susceptibles de provoquer la croyance en la vérité d'une théorie.

Les trois formulations de l'argument du miracle par Whewell, Poincaré et Duhem, peuvent sembler proches. De fait, les formulations actuelles de cet argument empruntent à chacune de ces trois versions. J. Worrall par exemple, soutient un réalisme structural comme Poincaré.

¹⁸DUHEM, *La Théorie physique*, p. 39–40.

Mais comme on l'a vu dans la citation en début de chapitre, il considère comme Duhem que ce sont seulement les prédictions de généralités empiriques qui permettent de savoir quelles relations théoriques ont leur correspondant dans la réalité et l'exemple qu'il prend est le même que celui de Duhem : la prédiction du point lumineux à partir de la théorie de Fresnel. Cependant, il a une conception heuristique de la nouveauté des prédictions comme Whewell.

Mais ce syncrétisme ne doit pas faire oublier une profonde différence entre l'argument du miracle de Duhem et ceux de ses deux prédécesseurs. Pour Whewell comme pour Poincaré, le succès de nouvelles prédictions a valeur de *preuve*¹⁹ de la vérité d'une théorie. Duhem affirme en revanche, en s'opposant explicitement à Poincaré, qu'aucune hypothèse ne peut être considérée comme *définitive* : « nous serions fort imprudents de dire, au sujet d'une hypothèse communément admise aujourd'hui : "Nous sommes certains que jamais nous ne serons conduits à l'abandonner par une expérience nouvelle, quelque précise qu'elle soit" »²⁰.

C'est pourquoi, quand on cherche à reconstruire la position de Duhem dans le débat sur le réalisme scientifique, on a du mal à trouver dans son épistémologie un réel *argument* en faveur du réalisme, parce que cette position est avant tout pour lui une intuition, « un acte de foi » :

Ainsi l'analyse des méthodes par lesquelles s'édifient les théories physiques nous prouve, avec une entière évidence, que ces théories ne sauraient se poser en explication des lois expérimentales ; et d'autre part, un acte de foi que cette analyse est incapable de justifier, comme elle est impuissante à le refréner, nous assure que ces théories ne sont pas un système purement artificiel, mais une classification naturelle. Et l'on peut, ici, appliquer cette profonde pensée de Pascal : « Nous avons une impuissance de prouver invincible à tout le Dogmatisme ; nous avons une idée de la vérité invincible à tout le Pyrrhonisme »²¹.

¹⁹Même si cette preuve n'est pas *déductive*, puisque ni l'inférence à la meilleure explication ni les arguments d'indispensabilité ne sont des déductions.

²⁰DUHEM, *La Théorie physique*, p. 323.

²¹DUHEM, *La Théorie physique*, p. 36.

Il faut prendre cette référence à la pensée L 406 de Pascal au sérieux : il y a bien, pour Duhem, une vérité des théories qui sont des classifications naturelles. Mais il s'agit d'une vérité que Pascal qualifierait de vérité du cœur et non de la raison, c'est-à-dire une vérité qui se *sent* comme celle des premiers principes et non une vérité à laquelle on aboutit par un raisonnement comme la vérité d'un théorème. Même en l'absence d'argument, les vérités du cœur n'en sont pas moins des certitudes, mais « il serait ridicule que le cœur demandât à la raison un sentiment de toutes les propositions qu'elle démontre pour vouloir les recevoir »²². Voilà pourquoi Duhem se limite à donner des *exemples* de succès prédictifs qui provoquent la croyance en la vérité d'une théorie et ne fournit pas de *preuve* de l'argument du miracle : ce serait pour lui aussi insensé que pour Pascal vouloir prouver « que nous ne rêvons point ».

La différence entre le rôle qu'attribuent Whewell et Poincaré d'un côté et Duhem de l'autre, aux prédictions est donc de taille : pour Duhem, les prédictions réussies ont une grande influence sur nos croyances envers une théorie, mais il s'agit de croyances que l'on ne peut pas prouver, qui ne sont que des intuitions.

Dans la suite de ce chapitre, j'examine s'il est possible de trouver un type de succès prédictif qui pourrait faire de l'argument du miracle une preuve concluante comme le soutiennent Whewell et Poincaré. J'examine d'abord quelles sont les nouvelles prédictions qui sont adaptées à l'argument du miracle formulé à la manière de Whewell, c'est-à-dire comme une inférence à la meilleure explication. Je montre ensuite que pour échapper à un certain nombre de problèmes, cette version de l'argument du miracle doit être prolongé par un argument d'indispensabilité similaire à celui de Poincaré pour déterminer quels aspects des théories passées et actuelles sont vrais. Enfin, je prouve que ces arguments d'indispensabilité doivent faire face à deux objections majeures qui n'ont pas encore reçu de réponse satisfaisante.

²²PASCAL, pensée L 110.

8.2 L'inférence à la meilleure explication et le dilemme du réaliste

8.2.1 Quels succès prédictifs doivent être expliqués par la vérité ?

Pour faire de l'argument du miracle une preuve de la vérité des théories scientifiques fondée sur leurs succès prédictifs, la voie la plus directe semble être de prouver que l'on ne peut expliquer leur succès *que* par leur vérité (ou du moins que cela semble être une meilleure explication de ces succès que le pur hasard). L'argument du miracle est donc souvent formulé, au premier abord, comme une *inférence à la meilleure explication*²³.

Pour la plupart des réalistes scientifiques, comme Jarett Leplin dans son ouvrage de 1996 *A Novel Defense of Scientific Realism*, les succès prédictifs qu'ils faut prendre en compte dans une « défense » du réalisme scientifique sont ceux dont la vérité est la *seule* explication envisageable :

L'explication du succès de la théorie doit être telle que les mécanismes théoriques qu'elle déploie sont ceux qui produisent réellement ce résultat. Il doit n'y avoir aucune alternative d'après laquelle la théorie explique (prétendument) le résultat alors que ce qui le produit réellement n'est pas relié à ce qui le produit d'après la théorie. [...] Si l'on doit expliquer le succès de cette théorie sans le regarder comme un pur hasard, on devra alors lui attribuer un certain degré de vérité²⁴.

Certains anti-réalistes, comme Baas Van Fraassen, ont proposé d'autres explications des succès théoriques qui ne font pas intervenir la vérité des théories²⁵, par exemple que les théories ont été *sélectionnées* pour être

²³Les argumentations réalistes fondées sur l'argument du miracle sont ainsi souvent engagées dans une défense de cette inférence. Voir notamment LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 116–120 et PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, p. 212–215.

²⁴LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 64.

²⁵BAS VAN FRAASSEN, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press, 1980.

couronnées de succès. De nombreuses discussions ont eu lieu pour savoir si cette explication en était réellement une²⁶, mais nous n'avons pas besoin ici d'entrer dans de tels détails.

En effet, l'objectif de ce chapitre est d'abord de déterminer quels succès prédictifs sont adaptés à l'argument du miracle et s'ils existent. Et l'on peut montrer que, si l'on considère l'argument du miracle comme une inférence à la meilleure explication, alors ce ne sont pas les mêmes prédictions qui sont nécessaires pour *confirmer* une théorie et celles qui sont *suffisantes* pour inférer à la vérité de cette théorie.

Si, en effet, l'argument du miracle se contentait d'affirmer que la confirmation par des prédictions est suffisante pour s'assurer de la vérité des théories, alors il consisterait à faire l'inférence à la meilleure explication suivante : toute confirmation par des prédictions est un fait surprenant qui ne peut être expliqué que par la vérité des hypothèses dont elle a été tirée. L'induction pessimiste de L. Laudan, montre que cette inférence à la meilleure explication est clairement trop libérale et a pour conséquence de rendre vraies de nombreuses théories passées incompatibles avec nos théories actuelles.

Un exemple frappant est la prédiction de l'existence et de la position de la planète Neptune à partir des perturbations d'Uranus, prédiction réalisée par Urbain Le Verrier (1811-1877) en 1846. Cette prédiction est souvent célébrée comme un succès de la théorie de la gravitation de Newton et il est certain qu'elle a renforcé la confiance en celle-ci. Mais pour réaliser cette prédiction, Le Verrier devait résoudre un problème mathématique complexe, qui est le problème inverse de celui que résout la méthode de Clairaut exposée dans le chapitre 7 (section 7.4) : calculer, à partir des perturbations d'un objet sur l'orbite d'une planète, les caractéristiques de l'orbite de cet objet (à savoir, en plus de la masse, son demi-grand axe, son excentricité, son inclinaison, l'argument de son périastre et la longitude du nœud ascendant). La longitude de l'astre perturbant Uranus, sa masse et son demi-grand-axe (c'est-à-dire sa distance maximale au Soleil) étant liés et tous trois inconnus, Le Verrier

²⁶Pour un état du débat sur cette question, voir Brad WRAY, "Selection and Predictive Success", *Erkenntnis* 72.3 (2010), p. 365–377.

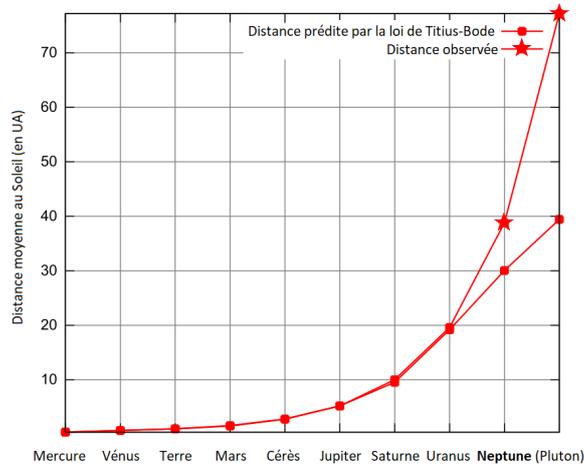


FIGURE 8.1 : La loi de Titius-Bode prédit la distance moyenne au Soleil (en ordonnées) de huit corps planétaires (en abscisses). Elle pouvait donc être considérée comme fiable jusqu'à la découverte de Neptune qui la réfuta. Cependant, elle joua un rôle indispensable dans la prédiction de la position de Neptune.

eut recours à une loi formulée en 1772 : la loi de Titius-Bode. Cette loi s'énonce ainsi :

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^{n-1}$$

où a est le demi-grand axe d'une planète exprimé en Unités Astronomiques (UA) et n le rang de cette planète à partir du Soleil. Cette loi donnait des résultats proches des valeurs observées pour toutes les planètes connues au XIX^e siècle, à part pour $n = 4$, suggérant la présence d'une planète inconnue entre Mars et Jupiter. Cette prédiction fut couronnée de succès lorsque l'astronome italien Giuseppe Piazzi (1746-1826) découvrit Cérès, un des plus gros corps de la ceinture d'astéroïde. Le Verrier pouvait donc considérer la loi de Titius-Bode comme confirmée et l'utiliser pour estimer la distance de Neptune au Soleil et, de là, sa longitude et sa masse (voir figure 8.1).

Mais il se trouve que la loi de Titius-Bode n'est pas correcte pour Neptune : elle prédit que son demi-grand axe mesure $38,8UA$, alors qu'il ne vaut que $30,1UA$. Neptune est donc le premier corps massif du système solaire à réfuter la loi de Titius-Bode, ce qui amena Le Verrier à surévaluer la masse de Neptune dans sa communication à l'Académie des Sciences

du 31 août 1846.

Pourtant, le 18 septembre 1846, l'astronome allemand Johann Galle (1812-1910) de l'observatoire de Berlin, observa Neptune à la position annoncée par Le Verrier (l'imprécision n'étant que d'un degré de longitude). En effet, la surestimation du demi grande-axe et de la masse de Neptune par Le Verrier l'a mené à surestimer l'*intensité* de la force perturbatrice de cette planète mais ne causa pas d'erreur sur la *direction* de cette force, qui, entre 1840 et 1850, était sensiblement la même que celle prédite par Le Verrier (voir figure 8.2). Cet exemple montre que les coïncidences se produisent parfois et peuvent jouer un rôle important dans des succès prédictifs considérés comme paradigmatiques. Remarquons que l'observation de Gall, en l'absence d'autres informations, confirme autant la loi de Newton que la loi de Titius-Bode. Ce n'est que plus tard, après de nouvelles observations, que l'on a pu rectifier les paramètres de l'orbite de Neptune et montrer que l'hypothèse de Titius-Bode était fausse. Une loi fausse peut donc être confirmée par un succès prédictif.

Cet exemple montre qu'à un instant donné, une hypothèse peut jouer un rôle décisif dans une prédiction réussie, même si, plus tard, l'état de nos connaissances ayant changé, on découvre qu'elle était fausse. C'est ce qui est arrivé à la loi de Titius-Bode, mais aussi à la loi de l'attraction universelle de Newton, bien qu'elle fût également impliquée dans le succès prédictif de la découverte de Neptune. Comme on l'a vu dans le chapitre 7 de cette thèse, la confirmation d'une théorie est toujours relative à un *contexte* donné, alors que la vérité d'une hypothèse ou d'une théorie ne doit pas dépendre d'un contexte, puisqu'elle est censée être définitive.

Autrement dit, même une hypothèse déclarée fausse par la suite peut être confirmée parce qu'elle était utile pour tirer une prédiction. Cette remarque n'a rien d'original — elle est au fondement de la défiance de Mill envers les prédictions (voir chapitre 6, section 6.1.3) — mais elle suffit à montrer que si l'on accepte que certaines prédictions ont un pouvoir de confirmation, on doit admettre que certains succès prédictifs suffisants pour confirmer une hypothèse doivent avoir d'autres explications que la vérité de cette hypothèse.

Par conséquent, quelque soit la conception que l'on a des prédictions

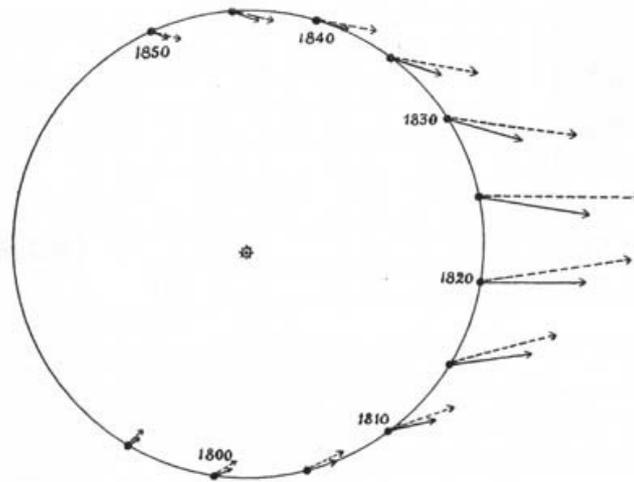


FIGURE 8.2 : Comparaison de la force perturbatrice de exercée sur Uranus par Neptune, réelle (traits pleins) et estimée par Le Verrier (traits pointillés). L'utilisation de la loi de Titius-Bode avait amené Le Verrier a surestimé l'intensité de la force gravitationnelle perturbatrice exercée par Neptune, mais aussi sa direction pour une période allant de 1815 à 1835. Cependant, en 1845, la direction prédite et la direction réelle sont quasiment alignées. Source : James LEQUEUX, *La découverte de Neptune par Le Verrier (1846)*, bibnum, 2010, URL : www.bibnum.education.fr/physique/astrophysique/la-decouverte-de-neptune-1846, p. 17.

et du rôle qu'elles jouent dans la confirmation d'une hypothèse, la leçon de l'induction pessimiste est que l'on ne peut pas définir de la même manière les prédictions dans le contexte de la confirmation et dans celui du réalisme. Les *nouvelles prédictions* ne sont donc pas *nécessaires* pour confirmer une théorie ou une hypothèse.

En outre, il est impossible que les nouvelles prédictions ne soient pas *suffisantes* pour confirmer une théorie, parce qu'alors l'argument du miracle échouerait à prouver que l'on peut avoir confiance en la vérité des théories *confirmées*. Cela mènerait en effet à la conséquence (absurde pour les réalistes) que le changement scientifique, au lieu de progresser vers des théories de plus en plus vraies, serait amené à éliminer certaines théories vraies au profit de théories fausses mais mieux confirmées.

Il faut donc, pour que l'argument du miracle soit concluant, que les nouvelles prédictions explicables uniquement par la vérité d'une théorie sous-jacente soient *suffisantes* mais *non-nécessaires* pour confirmer cette théorie : les nouvelles prédictions forment ainsi un sous-ensemble des prédictions permettant de confirmer une théorie.

Cela signifie que la définition des nouvelles prédictions doit être plus contraignante que celle des prédictions qui pèsent dans la confirmation, afin que seule une partie des hypothèses confirmées par des prédictions puissent être considérées comme vraies.

Mais la plupart des partisans du réalisme scientifique ne font pas la distinction entre la définition des prédictions dans le contexte de la confirmation et dans le contexte du réalisme. Cette distinction est pourtant indispensable pour que l'argument du miracle soit une inférence à la meilleure explication convaincante. Dans la suite de cette section, j'examine les quelques définitions contraignantes des nouvelles prédictions qui ont été proposées et les objections que l'on peut leur opposer.

8.2.2 Les définitions contraignantes des nouvelles prédictions

Les trois philosophes contemporains qui proposent une conception des prédictions adaptées à l'argument du miracle sont J. Worrall²⁷, Jarett Leplin²⁸ et Mario Alai²⁹. Ces trois conceptions énoncent des critères de plus en plus contraignants pour qualifier une prédiction de *nouvelle*.

Le premier critère, déjà reconnu par Whewell et Duhem dont s'inspire J. Worrall, est qu'une nouvelle prédiction prédise de nouveaux phénomènes et pas seulement des phénomènes d'un genre déjà connu. En effet, imaginons que l'on utilise une loi empirique déjà connue, comme la relation entre la chaleur d'un métal et son volume, pour prédire qu'à une température donnée, une barre de métal aura une longueur donnée. On peut très bien tirer cette prédiction par extrapolation ou interpolation de données déjà connues. Un tel succès prédictif peut donc s'expliquer sans faire référence à la vérité d'une théorie : il suffit de s'assurer que l'on a des données précises et fiables auxquelles on applique une procédure statistique elle-même fiable.

En revanche, lorsque l'on utilise des données pour prédire un phénomène d'un genre différent, comme l'apparition d'un point lumineux dans l'ombre d'un disque circulaire à partir d'une théorie de la diffraction, alors il est nécessaire de faire appel à une théorie. C'est pourquoi, d'après J. Worrall, seules comptent, dans le contexte du réalisme, les prédictions de « nouvelles généralisations empiriques » et non seulement de « nouvelles instances de généralisations » déjà connues³⁰. C'est ce que soulignent aussi J. Leplin, qui considère qu'une nouvelle prédiction ne peut être uniquement le résultat d'une « induction directe »³¹ et M. Alai, qui exige que le phénomène prédit soit « hétérogène aux données déjà connues », c'est-à-dire « impossible à inférer des données déjà connues à

²⁷WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?"

²⁸LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, ch.3.

²⁹Mario ALAI, "Novel Predictions and the No Miracle Argument", *Erkenntnis* 79.2 (2014), p. 297–326.

³⁰WORRALL, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", p. 114.

³¹LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 104–115.

partir d'une procédure de généralisation standard »³².

L'autre contrainte que J. Worrall fait peser sur les nouvelles prédictions est qu'elles soient *heuristiquement* nouvelles, c'est-à-dire qu'elles prédisent un phénomène ou une loi qui n'a pas été utilisé dans le processus prédictif de la prédiction pour fixer certaines variables. Cette contrainte provient de la conception de la confirmation développée par É. Zahar et J. Worrall (voir section 7.1.2). Les nouvelles prédictions sont un cas *particulier* des prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation des théories : elles doivent donc hériter des caractéristiques qui définissent celles-ci, sinon on arriverait à la conclusion que certaines théories vraies n'ont pas été confirmées.

Cependant, J. Leplin considère que les nouvelles prédictions ne peuvent être seulement *heuristiquement* nouvelles : elles doivent aussi être *théoriquement* nouvelles, c'est-à-dire prédire un phénomène qui n'a jamais été prédit par aucune autre théorie (voir chapitre 6, section 6.4.1). J. Leplin ajoute cette contrainte pour éviter les cas de sous-détermination empirique des théories, c'est-à-dire les cas où un même phénomène est prédit par deux théories incompatibles. En effet, dans une telle situation, l'inférence à la meilleure explication de l'argument du miracle est bloquée. Le phénomène de réflexion de la lumière par exemple, pouvait être heuristiquement prédit à la fois par la théorie *corpusculaire* de la lumière (comme un rebond des particules lumineuses) et par la théorie *ondulatoire* de la lumière (comme l'émission d'une nouvelle onde lumineuse) : on ne peut donc pas conclure qu'une de ces deux théories est plus vraie que l'autre à partir de cette prédiction.

Voilà pourquoi J. Leplin impose *deux* conditions, d'après lui suffisantes, pour caractériser la nouveauté d'un résultat O par rapport à une théorie T :

- Une condition d'*indépendance* : il faut que l'on puisse reconstruire le raisonnement menant à la théorie T sans citer le résultat O ;
- Une condition d'*unicité* : il faut qu'à l'époque où T prédise O , aucune théorie viable autre que T prédise aussi O ³³.

³²ALAI, "Novel Predictions and the No Miracle Argument", p. 310.

³³LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 77. Cette condition d'unicité

La première condition impose qu'une nouvelle prédiction soit une prédiction *heuristiquement* nouvelle, la seconde qu'elle soit *théoriquement* nouvelle : ces deux conceptions de la nouveauté des prédictions ne sont pas équivalentes, mais rien n'empêche d'en faire la conjonction.

Ainsi, pour J. Leplin, la théorie de la relativité générale a été confirmée lorsqu'elle a prédit correctement l'avancée du périhélie de Mercure. Mais comme cette prédiction pouvait être faite par la théorie de Newton avec des hypothèses auxiliaires adaptées (comme par exemple supposer la présence de certains métaux au cœur de Mercure pour accroître sa densité), il ne s'agit pas d'une prédiction satisfaisant la condition d'unicité. Cette prédiction n'est donc pas suffisamment *nouvelle* pour appliquer l'argument du miracle à la théorie de la relativité générale. En revanche, la réussite de l'expédition d'Eddington ayant testé la prédiction de la courbure de la lumière d'une étoile lointaine par la masse du Soleil constitue un succès prédictif satisfaisant les deux conditions d'indépendance et d'unicité, puisque la théorie de Newton ne peut expliquer la déviation de rayons lumineux par le Soleil³⁴. Cette prédiction compte donc comme une nouvelle prédiction pour J. Leplin : elle permet d'appliquer l'argument du miracle à la théorie de la relativité générale et de s'assurer qu'il n'y a pas d'autre explication satisfaisante de sa réussite que la vérité de la théorie d'Einstein³⁵.

De même, pour J. Leplin, la prédiction du point lumineux est la première des prédictions de la théorie de Fresnel qui satisfait la condition d'unicité. C'est pour cela que même si elle n'a eu que peu d'importance *historique*, elle a beaucoup d'importance *philosophique* : elle est la première prédiction réussie de cette théorie qui permette d'appliquer l'argu-

est similaire à celle que Mill avait imposée à la méthode hypothétique (et donc aux prédictions tirées d'une hypothèse) pour qu'elle puisse fournir une *preuve* de la vérité d'une hypothèse (voir chapitre 6, section 6.1.3), à la différence que pour Mill il ne devait exister aucune théorie *T* alternative *concevable*.

³⁴Il est vrai que, si l'on attribue une masse aux corpuscules de lumière, il est possible de faire une telle prédiction dans le cadre de la théorie de Newton. Mais d'après J. Leplin cette prédiction était impossible à faire en 1919, parce que la théorie corpusculaire de la lumière avait été abandonnée depuis un demi-siècle. Voir LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 78.

³⁵LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 79.

ment du miracle à l'optique ondulatoire³⁶.

Pour M. Alai, les deux conditions de J. Leplin sont nécessaires, mais restent insuffisantes pour définir les prédictions adaptées à l'argument du miracle³⁷. Non seulement il exige, pour parler de nouvelle prédiction, que le résultat prédit d soit *a priori* improbable, c'est-à-dire qu'il ne puisse être prédit par pure chance, mais il ajoute qu'il faut que la théorie T et les hypothèses auxiliaires A_j conjointes à T pour prédire un résultat d soient *indépendamment plausibles*, c'est-à-dire puissent être justifiées sans faire référence à d ³⁸. Cela signifie que toutes les hypothèses utilisées dans la dérivation de d ne doivent être justifiées, soit parce qu'elles ont été confirmées par d'autres données, soit parce qu'elles sont des conséquences d'autres théories que T .

Cet ajout d'un critère de plausibilité portant sur les auxiliaires A_j est crucial : il permet d'éviter un cas de succès prédictif que J. Leplin aurait considéré comme suffisant pour appliquer l'argument du miracle, alors qu'il mènerait à qualifier comme vraies des hypothèses dont le succès peut être expliqué autrement.

Cette circonstance apparaît lorsque le succès d'une hypothèse ne semble dû qu'aux hypothèses auxiliaires qui lui ont été conjointes pour tirer une prédiction. Par exemple, les phénomènes de rotation de polarisation de la lumière ont été prédits par Jean-Baptiste Biot (1774-1862) à partir de la théorie corpusculaire de la lumière dix ans avant que Fresnel ne développe sa théorie de l'optique ondulatoire. Les lois de rotation du plan de polarisation de la lumière étaient dérivées de plusieurs hypothèses auxiliaires attribuant un mouvement d'oscillation conique des corpuscules lumineux autour de leur axe de translation³⁹. Cette prédic-

³⁶LEPLIN, *A Novel Defense of Scientific Realism*, p. 85.

³⁷ALAI, "Novel Predictions and the No Miracle Argument", p. 304.

³⁸ALAI, "Novel Predictions and the No Miracle Argument", p. 315.

³⁹On peut donner « aux axes de polarisation un mouvement d'oscillation conique, semblable à la nutation terrestre, autour de la position moyenne que nous leur avons ici supposée. [...] Cette manière de voir, plus générale, paraît nécessitée par une classe de phénomènes que nous décrirons dans la suite, où les molécules lumineuses, convenablement préparées, subissent à travers des cristaux la réfraction ordinaire, non-seulement dans une position déterminée de la section principale, mais dans une amplitude, quelque fois considérable, à droite et à gauche de cette position. » Jean-Baptiste BIOT, *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. 4, Paris, Deterville, 1816, p. 284.

tion respecte bien les deux critères de J. Leplin : elle est *indépendante* parce que la théorie corpusculaire de l'optique peut se justifier sans faire appel aux phénomènes de polarisation et elle est *unique* parce qu'au début du XIX^e siècle, aucune autre théorie ne pouvait rendre compte de ces phénomènes. Et pourtant, il semble que ce succès prédictif soit à attribuer aux hypothèses auxiliaires utilisées par Biot plus qu'à la théorie corpusculaire en tant que telle, parce que ces hypothèses attribuent à la lumière un aspect *périodique*. Or l'introduction de ces hypothèses auxiliaires n'est justifiée que pour rendre compte des phénomènes de polarisation. On ne peut donc pas appliquer l'argument du miracle à ce cas et considérer que la seule explication du succès prédictif de la théorie de Biot soit la vérité de l'hypothèse fondamentale de la théorie corpusculaire de la lumière.

En exigeant que les hypothèses auxiliaires utilisées dans une prédiction soient indépendamment plausibles, M. Alai restreint donc encore la définition des nouvelles prédictions. Les succès prédictifs qui peuvent mener, par une inférence à la meilleure explication, à soutenir la vérité d'une théorie représentent alors un petit nombre de cas surprenants et impressionnants. Pourtant, je montre dans ce qui suit que même cette définition restreinte des nouvelles prédictions ne suffit pas pour appliquer l'argument du miracle, parce qu'il faut distinguer la *plausibilité* et le *réalisme* d'une hypothèse auxiliaire.

8.2.3 Le problème des idéalizations

Les définitions restrictives des nouvelles prédictions exposées ci-dessus conduisent à un problème épineux : elles circonscrivent une classe de prédictions qui font intervenir des hypothèses certes plausibles mais idéalisées, qui semblent, à première vue du moins, être des fictions sans rapport à la réalité.

En effet, le point commun entre toutes les conceptions des nouvelles prédictions décrites ci-dessus est qu'elles exigent que les succès prédictifs ne soient pas obtenus par une « induction directe » ou « une procédure de généralisation standard », c'est-à-dire par ce que j'ai appelé, dans la conclusion de la première partie de cette thèse, *des prédictions guidées par des données*. Cela signifie que les nouvelles prédictions que les parti-

sans du réalisme scientifique cherchent à définir sont soit des *prédictions guidées par des modèles*, soit des *prédictions guidées par des lois*. Or, ces deux types de prédictions ont pour caractéristique commune d'employer des hypothèses auxiliaires idéalisées.

Les réalistes sont donc pris dans un dilemme : ils veulent prouver la vérité des théories scientifiques à partir de prédictions qui ont pour particularité d'utiliser des hypothèses qui ne semblent pas pouvoir être interprétées littéralement comme ayant une référence dans la réalité.

Le problème des idéalizations qui mènent à ce dilemme est le suivant : certaines hypothèses qui jouent un rôle essentiel dans les succès prédictifs semblent être empiriquement plausibles et pourtant sont impossibles à interpréter littéralement.

J'ai développé dans les sections 1.4.2 et 1.4.3 du premier chapitre deux exemples de ces hypothèses simplificatrices et idéalizations qui interviennent dans des prédictions guidées par des lois. Peut-être ne serait-il pas inutile ici de montrer que de telles hypothèses apparaissent aussi dans le cas paradigmatique de la prédiction du point lumineux dérivée à partir de la théorie optique de Fresnel (on examine un exemple de prédiction guidée par un modèle dans la section suivante).

L'histoire de la prédiction du point lumineux a été l'objet de plusieurs travaux, notamment par J. Worrall⁴⁰ : en 1818, Fresnel présente à l'Académie des Sciences de Paris un *Mémoire sur la diffraction*. D'après le *Rapport sur le Mémoire de M. Fresnel* écrit par François Arago (lequel avait poussé Fresnel à présenter ses travaux), l'un des membres du jury, Poisson, prouva que l'on pouvait déduire deux conséquences des équations de Fresnel : la présence d'un point obscur au centre de la projection d'une lumière diffractée par une ouverture circulaire et la présence d'un point lumineux au centre de l'ombre d'un objet sphérique ou circulaire⁴¹. Rien ne permet d'affirmer que ces deux prédictions de Poisson, partisan de la théorie corpusculaire de la lumière, aient été faite pour discréditer la théorie ondulatoire de la lumière. Mais Arago réussit à réaliser les deux

⁴⁰WORRALL, "Fresnel, Poisson and the white spot : the role of successful predictions in the acceptance of scientific theories".

⁴¹Augustin FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, Paris, Imprimerie Impériale, 1866, p. 245.

expériences et confirma les deux prédictions.

Ce qui nous intéresse ici, c'est la dérivation des prédictions de Poisson. Malheureusement, à ma connaissance, il n'existe aucune source historique indiquant précisément comment Poisson en est arrivé à ce résultat⁴². Mais on peut reconstruire cette preuve à partir du *Rapport* d'Arago, qui mentionne clairement l'utilisation des intégrales de Fresnel pour prédire le cas du point obscur. De plus, Fresnel affirme dans une *Note* placée en appendice de son *Mémoire* que Poisson lui a aussi donné la preuve de la prédiction du point lumineux⁴³. On peut donc supposer que Poisson utilisa les intégrales de Fresnel dans les deux cas.

Par conséquent, la première hypothèse utilisée par Poisson pour dériver les prédictions du point obscur et du point lumineux sont les équations de Fresnel, qui traduisent mathématiquement, sous forme d'intégrale, le principe de Huygens d'après lequel :

Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points peuvent être regardées comme la somme des mouvements élémentaires qu'y enverraient au même instant, en agissant isolément, toutes les parties de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures⁴⁴.

Les intégrales de Fresnel concernent ainsi l'amplitude des ondes lumineuses. Pour appliquer ces équations au cas du point lumineux, Poisson a donc dû utiliser une autre hypothèse pour relier l'amplitude à l'intensité lumineuse. Dans la théorie de Fresnel, l'intensité lumineuse en un point est égale au carré de l'amplitude de l'onde lumineuse en ce même point.

Ces deux hypothèses ne sont pas suffisantes pour appliquer les intégrales de Fresnel au cas d'une ouverture ou d'un disque circulaire. Les intégrales de Fresnel sont extrêmement difficiles à manipuler si la lumière est diffractée par un objet de forme complexe. Pourtant Arago écrit que Poisson avait « fait remarquer à M. Fresnel que l'intégrale qui représente l'intensité de la lumière diffractée peut *aisément* s'obtenir pour le centre

⁴²On donne, en annexe, une preuve mathématique moderne du point lumineux à laquelle aurait pu ressembler celle de Poisson.

⁴³FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 365.

⁴⁴FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 293.

de l'ombre d'un écran ou d'une ouverture circulaire »⁴⁵. On peut en inférer que Poisson fit, explicitement ou implicitement, l'hypothèse que le disque ou l'ouverture avait une forme *parfaitement circulaire*⁴⁶.

Enfin, comme pour toute prédiction guidée par des lois, Poisson a dû utiliser une hypothèse pour fixer les conditions aux limites de son système. Dans le cas du point lumineux, la lumière diffractée occupe tout l'espace depuis le bord de l'écran jusqu'à l'infini (voir figure 9.17 dans l'annexe au chapitre 8 consacrée à la prédiction de Poisson). Pour résoudre les intégrales de Fresnel, Poisson a donc dû accepter l'hypothèse suivante : à l'infini, la valeur de l'intégrale est nulle, ce qui signifie que les parties de l'onde lumineuse à l'infini se comportent comme des rayons géométriques qui ne sont pas diffractés.

Si l'on résume, la dérivation du point lumineux par Poisson devait reposer sur *au moins* quatre hypothèses :

- *Une loi* : les intégrales de Fresnel.
- *Une relation de correspondance* entre l'intensité et l'amplitude de l'onde : l'intensité est proportionnelle au carré de l'amplitude ($I \propto u^2$).
- *Une hypothèse simplificatrice* : l'écran projetant une ombre est parfaitement circulaire.
- *Une condition aux limites* : à l'infini l'onde se comporte comme des rayons géométriques.

On pourrait continuer à détailler les hypothèses nécessaires à la dérivation de Poisson, mais on voit que lorsque l'on cherche à appliquer des

⁴⁵FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 245. Je souligne.

⁴⁶On peut même en être quasiment certain si l'on sait que la diffraction par un objet imparfaitement circulaire n'a été résolu que dans les années 1980 à l'aide de simulations numériques : voir James HARVEY et James FORGHAM, "The Spot of Arago : New relevance for an old phenomenon", *American Journal of Physics* 52.3 (1984), p. 243–247. Même si Poisson était un mathématicien hors-pair, il n'aurait pas « aisément » résolu le cas d'un disque irrégulier. De plus, ces simulations montrent que le phénomène du point lumineux est très sensible aux irrégularités à petites échelles : une déformation sinusoïdale du bord de l'écran d'une amplitude de $100\mu m$ fait quasiment disparaître le point lumineux. Poisson a donc bien dû faire l'hypothèse que le disque était *parfaitement* circulaire et pas seulement *vaguement* circulaire.

lois à des cas concrets, on rencontre rapidement la nécessité d'utiliser des hypothèses que l'on peut qualifier d'*idéalisations*.

On peut définir une idéalisation comme l'antécédent non-réalisé d'un énoncé contrefactuel. L'hypothèse simplificatrice ci-dessus peut par exemple s'énoncer ainsi : « si l'écran était parfaitement circulaire, alors on devrait observé un point lumineux dans son ombre »⁴⁷. Une idéalisation est donc par définition une hypothèse *fictionnelle*, c'est-à-dire qui suppose de tenir momentanément pour vraie une affirmation que l'on sait fausse.

Mais on peut être plus précis et distinguer non seulement différents types d'idéalisations, mais aussi les idéalizations des *abstractions* et des *approximations*. Julie Jebeile propose ainsi de définir les abstractions comme des hypothèses qui décrivent un système en omettant certaines de ses propriétés, les approximations comme des hypothèses qui ont pour seul objectif de rendre un calcul réalisable et les idéalizations comme des hypothèses qui déforment un modèle en lui attribuant des propriétés qu'il n'a pas⁴⁸. Parmi les idéalizations, elle distingue aussi les idéalizations *mathématiques* qui consistent à substituer une représentation mathématique à un objet physique, les idéalizations *formelles* qui omettent certaines relations entre les objets (par exemple l'attraction gravitationnelle) et les idéalizations *matérielles* simplifiant la nature de la matière du système.

Ces distinctions se révèlent pertinentes pour examiner le cas de la prédiction de Poisson : l'hypothèse selon laquelle l'écran est parfaitement circulaire est une idéalisation mathématique, tandis que la condition aux limites selon laquelle la lumière se comporte comme des rayons géométriques à l'infini est une approximation. Or, comme le remarque J. Jebeile :

A l'opposé des idéalizations formelles, les approximations ne trouvent pas toujours de corollaire physique identifiable. Je veux dire par là qu'il n'est pas possible de dire explicitement à quelle déformation physique elles correspondent⁴⁹.

⁴⁷Voir LAYMON, "Scientific realism and the hierarchical counterfactual path from data to theory", p. 108.

⁴⁸JEBEILE, "Explication et compréhension dans les sciences empiriques, les modèles scientifiques et le tournant computationnel", p. 28-33.

⁴⁹JEBEILE, "Explication et compréhension dans les sciences empiriques, les modèles

Les approximations constituent donc un cas à part des idéalizations parce que ces hypothèses ne semblent pas être de simples déformations de caractéristiques réelles d'un système, mais des hypothèses utilisées uniquement comme auxiliaires d'une prédiction et qui ne renvoient à aucune caractéristique du système physique étudié.

Pour simplifier, suivant ici A. Chakravartty, je ne distinguerai que deux types d'hypothèses qui peuvent poser problème aux réalistes : les abstractions et les idéalizations. L'abstraction est un « processus par lequel seuls certains facteurs pertinents présents dans la réalité sont représentés dans un modèle ou une description »⁵⁰, tandis que « la caractéristique spécifique des idéalizations est que les éléments d'un modèle soient assemblés de telle manière qu'ils diffèrent des choses qu'il représente [...] en incorporant des facteurs qui ne peuvent pas exister étant donné les propriétés et relations des choses représentées »⁵¹. Une abstraction n'est qu'une version schématique de la réalité, tandis qu'une idéalisation, comme le remarque J. Jebeile au sujet des approximations, est une déformation qui n'existe pas dans la réalité, voire qui est incompatible avec ce que l'on sait de la réalité.

Ainsi, des hypothèses comme la condition aux limites citée ci-dessus se révèlent être des idéalizations qui posent un problème délicat pour l'argument du miracle conçu comme une inférence à la meilleure explication, puisqu'elles montrent que cet argument attribue de la vérité à des hypothèses qui ne semblent pourtant avoir rien de réel.

8.2.4 La stratégie de la désidérialisation et ses limites

Pour éviter cette embarrassante conclusion, plusieurs philosophes ont soutenu que les idéalizations nécessaires aux succès prédictifs recèlent une part de vérité, au sens où l'on qu'on peut les ramener d'une manière ou d'une autre à des hypothèses *réalistes*, c'est-à-dire qui peuvent être interprétées littéralement.

scientifiques et le tournant computationnel", p. 32.

⁵⁰CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 190.

⁵¹CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 191.

Ernan MacMullin, notamment, affirme que les idéalizations scientifiques sont des « idéalizations galiléennes » que l'on peut « désidéali- ser », c'est-à-dire que ce ne sont que des simplifications pratiques qui peuvent être éliminées par un traitement mathématique ou expérimental plus complet du système étudié⁵². Ronald Laymon considère de la même manière qu'en physique les idéalizations ne sont que des hypothèses temporaires et que leur remplacement progressif par des hypothèses de moins en moins idéalisées est une preuve en faveur du réalisme scientifique⁵³.

Si l'on revient au cas de la prédiction du point lumineux par Poisson, il semble clair que la simplification qui consiste à affirmer que l'écran est parfaitement circulaire peut être désidéalisée : c'est ce qu'ont fait les chercheurs qui, en 1984, ont mené des recherches sur la diffraction par des écrans irréguliers⁵⁴. Ces hypothèses que l'on a appelées des abstractions ne représentent en effet aucune menace pour les réalistes.

Mais il n'en suit pas pour autant que les idéalizations soient aussi faciles à traiter que les abstractions. A. Chakravartty suggère ainsi, dans un parallèle frappant entre représentations scientifiques et artistiques, que les abstractions et les idéalizations constituent deux « conventions différentes pour extraire de l'information de représentations » [225]⁵⁵ comme la peinture figurative et la peinture abstraite sont deux conventions différentes pour représenter un sujet. Il ne suffit pas de compléter les détails d'une idéalisation pour la rendre réaliste comme on peut le faire avec une abstraction. Cependant, A. Chakravartty semble considérer qu'il existe des méthodes désidéalisation pour toutes les idéalizations⁵⁶ et que l'on peut ainsi estimer la distance à la réalité d'une théorie selon son degré de désidéalisation.

Or il n'est pas sûr qu'une idéalisation comme la condition aux limites

⁵²Ernan MCMULLIN, "Galilean idealization", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16.3 (1985), p. 247–273.

⁵³LAYMON, "Scientific realism and the hierarchical counterfactual path from data to theory", p. 114.

⁵⁴HARVEY et FORGHAM, "The Spot of Arago : New relevance for an old phenomenon".

⁵⁵CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*.

⁵⁶Même si elles varient selon les disciplines et les époques, voir CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 228

d'après laquelle l'onde lumineuse n'est pas diffractée à l'infini puisse effectivement être désidéalisée. Robert Batterman a montré que de telles hypothèses sont « des cas d'idéalisations "non-traditionnelles" dans lesquels les idéalisations jouent un rôle essentiel et indispensable dans des contextes d'explication »⁵⁷. L'un des exemples de R. Batterman est l'explication de l'apparition d'arcs-en-ciels quand la lumière est diffractée par des gouttes d'eau :

Dans le contexte des phénomènes d'arcs-en-ciels, nous sommes dans le règne de la théorie ondulatoire, où les ondes lumineuses sont gouvernées par une équation d'onde. Si nous étudions la limite de ces équations, où la longueur d'onde approche zéro, on pourrait s'attendre à arriver doucement à des rayons géométriques. [...] Cependant, une telle limite n'existe pas. Il existe plusieurs sauts et singularités mathématiques lorsque la longueur d'onde tend vers zéro. Mais le comportement asymptotique de cette équation est essentielle pour comprendre pourquoi les arcs-en-ciels apparaissent avec toujours le même schéma d'intensité et d'espacement entre leurs arcs⁵⁸.

Le caractère indispensable de telles « idéalisations asymptotiques » réside dans l'utilisation mathématique de limites « grâce auxquelles différents détails peuvent être mis de côté »⁵⁹. Une désidéalisation de ces idéalisations asymptotiques réintégrerait ces détails dans la description du phénomène étudié et ne pourrait expliquer ni sa stabilité ni sa régularité.

La condition aux limites de la prédiction du point lumineux est un exemple d'idéalisation asymptotique que l'on ne peut pas éliminer. Comme dans le cas de la diffraction des ondes lumineuses par des gouttes d'eau, la diffraction par un objet circulaire demande aussi de considérer la limite entre l'optique ondulatoire et l'optique géométrique. Si l'on ne supposait

⁵⁷Robert BATTERMAN, "On the explanatory role of mathematics in empirical science", *The British journal for the Philosophy of Science* 61.1 (2010), p. 1–25, p. 19.

⁵⁸BATTERMAN, "On the explanatory role of mathematics in empirical science", p. 23–24.

⁵⁹BATTERMAN, "On the explanatory role of mathematics in empirical science", p. 23.

pas qu'à l'infini la lumière se comporte comme des rayons géométriques, alors il faudrait prendre en compte d'autres sources de diffraction. Le point lumineux n'apparaîtrait alors qu'à certaines distances de la source lumineuse. Or ce n'est pas le cas : le point lumineux est indépendant de la distance entre la source, l'écran et son ombre.

On ne peut donc pas désidéaler la condition aux limites nécessaire pour réaliser la prédiction du point lumineux. Cela ne signifie pas pour autant que cette hypothèse ne soit pas *plausible*. Comme le suggère Uksali Mäki⁶⁰, il est possible de reformuler certaines idéalizations fausses en termes de *négligeabilité*. On pourrait ainsi reformuler la conditions aux limites de la preuve de Poisson par cette paraphrase : « les parties d'une onde diffractée par un objet qui se trouvent très loin de cet objet sont diffractées de manière négligeable, c'est-à-dire imperceptible par nos meilleurs instruments de mesure. » Cette reformulation montre que la condition aux limites peut être justifiée empiriquement parce que, pour un expérimentateur, la contribution des parties de l'onde très éloignées de l'écran n'est pas perceptible par ses meilleurs instruments de mesure.

Mais cette reformulation n'est pas logiquement équivalente à la condition aux limites nécessaire pour dériver la prédiction du point lumineux : l'infini réel n'est pas un concept physique pouvant être testé par un instrument de mesure. Tout ce que prouve cette reformulation, c'est que les scientifiques n'ont aucune preuve empirique contre l'utilisation de cette condition aux limites. Elle est donc *plausible* : il n'y a aucune contre-indication à son utilisation dans le traitement mathématique de problèmes scientifiques (et de nombreuses résolutions de problèmes de diffraction utilisent cette condition aux limites). Elle n'en est pas pour autant *réaliste* puisqu'elle décrit un événement auquel on ne peut faire correspondre un phénomène réel, étant donné qu'il n'existe ni infini physique ni transformation des ondes lumineuses en rayons géométriques dans la nature.

Les exemples donnés ci-dessus n'ont pas pour visée de montrer que tout succès prédictif comprend des idéalizations à la fois indispensables

⁶⁰Uksali MÄKI, "The Truth of False Idealizations in Modeling", *Models, Simulations, and Representations*, sous la dir. de Paul HUMPHREYS et Cyrille IMBERT, New York, Routledge, 2011, p. 1–23.

et impossibles à désidéaler. Mais ils montrent qu'il faut différencier le caractère *plausible* d'une hypothèse (au sens où il est possible d'y croire à un degré non négligeable) et son caractère *réaliste* (au sens où l'on pourrait l'interpréter littéralement comme une hypothèse sur le monde physique). Les hypothèses auxiliaires utilisées pour dériver des prédictions peuvent être plausibles, parce qu'elles sont justifiées empiriquement ou par d'autres théories, mais leur signification physique peut rester un défi pour un réaliste. C'est pourquoi la conception des nouvelles prédictions de M. Alai, qui impose que les hypothèses impliquées dans une prédiction soient *indépendamment plausibles*, ne suffit pas pour définir les succès prédictifs adaptés à l'argument du miracle.

8.2.5 Le dilemme des réalistes

Pour conclure cette section, on peut revenir sur le dilemme des réalistes exposé à la fin de la première partie de cette thèse et en expliquer désormais la source. Rappelons que les succès prédictifs déterminant le changement scientifique et le choix des hypothèses sont ceux qui impliquent des prédictions fécondes. Autrement dit, ce sont ceux qui permettent de prendre la mesure de la capacité prédictive d'une théorie ou d'un modèle : plus une théorie ou un modèle semblera, au travers de ses prédictions, avoir une importante capacité prédictive, plus il sera valorisé.

Mais, comme le fait bien remarquer J. Jébeile, les idéalizations et approximations sont essentielles pour qu'une théorie ou un modèle puisse réaliser des prédictions variées⁶¹. Sans ces hypothèses fictionnelles, on ne pourrait réaliser que des prédictions guidées par des données, certes précises et réalistes, mais idiosyncratiques à des systèmes très particuliers et restreintes à des cas d'interpolation.

Ces idéalizations et approximations peuvent être justifiées empiriquement ou théoriquement et donc être *plausibles* (on a même fait remarquer dans la section 7.3.3 que la plausibilité des hypothèses auxiliaires était un élément crucial d'un succès prédictif confirmant une théorie). Mais cela n'implique pas qu'elles soient *réalistes*, c'est-à-dire interprétables lit-

⁶¹ JEBEILE, "Explication et compréhension dans les sciences empiriques, les modèles scientifiques et le tournant computationnel", p. 44.

téralement comme des postulats décrivant la réalité.

Le dilemme des réalistes est donc le suivant : les réalistes veulent des théories ou des modèles bien confirmés et cela les amène à sélectionner des théories ou modèles ayant une importante capacité prédictive. De tels modèles et théorie doivent prédire de nombreux phénomènes et donc utiliser, dans leurs prédictions, des hypothèses auxiliaires consistant en des idéalizations et des approximations. Ces hypothèses sont difficiles à expliquer dans une épistémologie réaliste, puisque l'on ne peut pas leur attribuer de vérité et pourtant elles semblent indispensables aux succès prédictifs. Les réalistes sont donc pris entre le désir d'attribuer le plus de vérité aux théories qui ont le plus de capacité prédictive et le désir d'éviter les idéalizations et approximations qui accompagnent nécessairement cette capacité prédictive.

Il existe ainsi une tension entre le fait de rendre une théorie plus confirmée empiriquement (en augmentant sa capacité prédictive) et plus réaliste, au sens où elle rendrait compte de nombreux phénomènes empiriques sans hypothèses simplificatrices et idéalisées. Cette tension est bien connue de ceux qui étudient les compromis que l'on fait en modélisation. S. Rupy notamment, l'exprime de manière particulièrement claire dans le cas des modélisations utilisées en cosmologie et astrophysique qui doivent, pour être les plus réalistes possibles, intégrer de nombreux détails sous la forme de sous-modèles contenant de nombreux paramètres libres, ce qui empêche de les tester séparément :

L'impression générale était que plus une modélisation devenait détaillée et « réaliste » en intégrant un plus grand nombre et une plus grande variété de composants structuraux, plus l'on perdait le contrôle de sa validation empirique et donc plus l'on pouvait douter de la légitimité de son ambition à nous délivrer une représentation fidèle et fiable de la Galaxie⁶².

L'analyse que je propose ici ne fait qu'étendre ce constat des modèles aux théories scientifiques. Elle n'a pas pour objectif de démontrer que le réalisme scientifique est incohérent mais de suggérer que la question des

⁶²RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 181.

idéalisations doit être prise au sérieux par les réalistes, parce qu'elle remet en question une hypothèse souvent implicite dans leurs arguments. Cette hypothèse est que plus une théorie est confirmée empiriquement, plus elle est susceptible d'être interprétée littéralement comme vraie. P. Vickers a ainsi récemment suggéré un « tournant confirmationnel » selon lequel « lorsqu'une théorie connaît un succès prédictif, notre degré de croyance en cette théorie devrait augmenter proportionnellement au caractère risqué de cette prédiction (le résultat empirique prédit a une faible probabilité *a priori*) »⁶³. Mais une telle procédure qui calquerait l'engagement ontologique sur la confirmation d'une hypothèse aurait pour conséquence de nous que notre croyance au caractère réel d'une théorie changerait à chaque nouvelle révolution scientifique (on n'échapperait donc pas à l'induction pessimiste de L. Laudan) et de nous engager envers des idéalisation irréalistes.

Pour éviter ce dilemme, il est cependant possible de proposer une procédure pour discriminer, parmi les hypothèses d'une théories ou d'un modèle, ces hypothèses fictionnelles. Une telle procédure permettrait de sauver le statut de preuve de l'argument du miracle, en ne le faisant pas porter sur *toutes* les hypothèses qui apparaissent dans un processus prédictif, mais en le circonscrivant à *certaines* de ses postulats seulement. Cela conduit à prolonger l'argument du miracle par un argument d'indispensabilité, puisque ce sont alors uniquement les hypothèses nécessaires au succès prédictif d'une théorie qui sont vraies, la théorie en elle-même n'étant que *partiellement vraie*. C'est cette stratégie que j'étudie dans la section suivante.

8.3 Le réalisme sélectif et le problème de la sous-détermination prédictive

Pour éliminer le problème des hypothèses auxiliaires fictionnelles et idéalisées, les réalistes doivent proposer une procédure qui permette de circonscrire les postulats qui, dans une théorie, dignes de foi, c'est-à-dire

⁶³Peter VICKERS, "Towards a realistic success-to-truth inference for scientific realism", *Synthese* (2016), publication en ligne, p. 10.

auxquels on peut attribuer un certain degré de vérité et espérer qu'ils seront retenus dans les théories futures. Autrement dit, si l'on peut énoncer une procédure rigoureuse pour définir la vérité partielle d'une théorie, on résout la question des idéalizations.

Dans cette section, j'expose d'abord la principale proposition d'une telle procédure pour définir la vérité partielle, connue sous le nom de stratégie *divide et impera*, avant de montrer qu'elle rencontre un problème majeur auquel aucune solution, à ma connaissance, n'a été encore apportée.

8.3.1 La stratégie du réalisme sélectif

Le principal souci pour sélectionner les aspects des théories qui sont dignes de foi est de ne pas tomber dans un raisonnement circulaire. En effet, si l'on affirme que les éléments d'une théorie qui sont vrais sont ceux qui se retrouvent dans les théories postérieures, on propose un critère de vérité *ad hoc* qui fait du réalisme scientifique une vérité tautologique : si une hypothèse est éliminée par le changement théorique c'est qu'elle était fautive et si elle y survit c'est qu'elle était vraie. Avec une telle philosophie, on ne risque pas de se tromper, mais on échappe de manière artificielle à l'induction pessimiste puisque l'on ne fait que reconstruire la vérité à partir du point de vue de nos théories actuelles.

Les réalistes doivent donc proposer une procédure pour circonscrire ces postulats théoriques dignes de foi indépendante de leur destinée dans des théories postérieures, c'est-à-dire qui pourrait s'appliquer aussi bien à nos théories actuelles qu'aux théories passées. L'idée fondamentale d'une telle procédure a été proposée par Philip Kitcher⁶⁴ et consiste à prolonger l'intuition de l'argument du miracle : si seules les théories qui ont connu des succès peuvent être considérées comme vraies, alors seuls les postulats qui ont été « déployés » dans ces succès peuvent être considérés comme vrais. Ainsi, comme on l'a vu dans l'introduction de cette thèse, l'argument du miracle confère aux nouvelles prédictions non seulement

⁶⁴Philip KITCHER, *The Advancement of Science : Science without Legend, Objectivity without Illusions : Science without Legend, Objectivity without Illusions*, Oxford University Press, 1993, p. 432.

un rôle de critère inter-théorique (trier entre les théories celles qui sont vraies de celles qui sont fausses) mais aussi de critère intra-théorique (trier, entre les postulats des théories partiellement vraies, ceux qui sont vrais de ceux qui ne le sont pas). Les conceptions réalistes qui font ce tri parmi les postulats théoriques sont regroupés ici sous le nom de *réalisme sélectif* (équivalent à l'appellation anglaise difficilement traduisible *deployment realism*).

Poincaré peut être considéré comme le précurseur de cette forme de réalisme, que l'on peut appeler « réalisme sélectif », et qui n'attribue qu'une vérité partielle aux théories scientifiques (voir section 8.1.1). Tous les partisans du réalisme structural qui s'inscrivent dans la suite de Poincaré sont, eux aussi, des réalistes sélectifs, puisqu'ils considèrent que seule la structure mathématique des théories scientifiques sont dignes de foi.

Mais c'est Stathis Psillos qui, dans son ouvrage *Scientific Realism : How science tracks truth*, a proposé la procédure la plus détaillée pour circonscrire les postulats théoriques dignes de foi. Cette procédure, qu'il appelle « divide et impera » (diviser pour régner) repose sur le rôle *indispensable* que jouent certains aspects d'une théorie dans ses succès :

Comment les réalistes peuvent-ils circonscrire les constituants vraisemblables de théories passées couronnées de succès? Je dois d'abord insister sur le fait que nous devrions nous concentrer sur les succès spécifiques de certaines théories, comme par exemple la prédiction, par la théorie de la diffraction de Fresnel, selon laquelle si un disque opaque intercepte les rayons émis par une source lumineuse, un point lumineux doit apparaître au centre de son ombre. [...] Ensuite, on doit se poser la question suivante : comment ces succès ont-ils été obtenus? Et en particulier : quels constituants théoriques ont eu une contribution essentielle à ces succès? [...]

Les constituants théoriques qui ont eu une contribution essentielle à ces succès sont ceux qui ont un rôle indispensables à leur génération. Ce sont ceux qui « alimentent réellement

la dérivation »⁶⁵.

Pour que cette procédure sélective soit réellement applicable à des cas concrets comme le souhaite S. Psillos, il faut préciser ce que signifie « avoir un rôle indispensable » dans la génération d'une prédiction et, partant, définir la notion d'*indispensabilité prédictive*. S. Psillos propose la définition suivante :

Quand un constituant théorique H contribue-t-il de manière indispensable à la génération d'une prédiction réussie ? Supposons que H , combinée à un autre ensemble d'hypothèses H' (et certains auxiliaires A) implique la prédiction P . H est indispensable à la génération de P si H' et A seuls n'impliquent pas P et qu'aucune autre hypothèse H^* consistante avec H' et A ne peut remplacer H sans perte dans la dérivation de P .⁶⁶

L'intérêt de la stratégie *divide et impera* est qu'elle est suffisamment précise pour être testable sur des exemples d'histoire des sciences : on peut déterminer quels sont les constituants théoriques indispensables à un processus prédictif et vérifier s'ils ont bien été retenus dans les théories postérieures. De nombreux cas intéressants de l'histoire des sciences ont ainsi été revisités, notamment par P. Vickers et T. Lyons, dans cette optique⁶⁷. Je propose de reprendre dans cette perspective le cas paradigmatique de la prédiction du point lumineux, cité par S. Psillos lui-même.

8.3.2 Les deux dérivations de la prédiction du point lumineux

Si l'on en reste à l'histoire traditionnelle du point lumineux de Poisson, il semblerait que la stratégie *divide et impera* de S. Psillos soit un succès. Comme on l'a vu dans la section précédente (voir aussi en annexe la

⁶⁵PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, p. 110.

⁶⁶PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, p. 110.

⁶⁷Voir notamment les listes dressées dans VICKERS, "A Confrontation of Convergent Realism" et LYONS, "Scientific Realism and the Stratagema de Divide Et Impera".

dérivation de cette prédiction à partir des intégrales de Fresnel), à aucun moment de la preuve de Poisson on ne semble avoir besoin de faire appel au postulat de l'éther : cela prouve que l'on peut attribuer une vérité partielle à la théorie de Fresnel en écartant ce postulat qui fut éliminé par la suite.

Comme on l'a vu, cependant, d'autres hypothèses auxiliaires embarrassantes pour les réalistes apparaissent dans cette prédiction : des idéalizations et des approximations. Mais la stratégie *divide et impera* n'accorde pas le statut de « vraisemblables » aux auxiliaires A qui, conjointes à H , permettent de dériver une prédiction P : seule H est considérée comme vraie⁶⁸.

Cependant, on n'est pas pour autant sorti d'affaire, parce que la stratégie *divide et impera* doit faire face à un autre problème, que nous avons déjà rencontré dans la deuxième partie de cette thèse (section 3.2.2) : la *sous-détermination prédictive*. Ce problème peut s'énoncer ainsi : pour une prédiction P et une théorie T donnée, il existe souvent plusieurs raisonnements prédictifs qui permettent de dériver P à partir de T . Ces processus n'étant pas fondés sur les mêmes hypothèses H de T , cela remet en question le caractère indispensable de ces hypothèses dans le succès prédictif de cette théorie.

Or, il se trouve que si l'on se penche sur les écrits de Fresnel, on trouve, dans la note qui suit son *Mémoire*, une autre dérivation du point lumineux que celle de Poisson. D'après Fresnel lui-même, cette preuve a pour but de « donner la solution la plus simple de ces deux problèmes [le point lumineux et le point obscur], *sans employer les intégrales* définies qui m'ont servi dans le *Mémoire* précédent à calculer les autres phénomènes de diffraction »⁶⁹.

⁶⁸Il y a là un problème important : pour appliquer la stratégie *divide et impera*, ou toute autre procédure de réalisme sélectif, il est nécessaire d'avoir un critère pour distinguer les hypothèses auxiliaires des hypothèses fondamentales des théories. Cependant, dans le cas du point lumineux comme dans le cadre de cette thèse, on ne peut développer ce problème : en effet, on peut accorder que, quel que soit le critère que l'on adopte pour distinguer hypothèses fondamentales et hypothèses auxiliaires, les conditions aux limites comptent comme des hypothèses auxiliaires et donc que la stratégie *divide et impera* écarte les idéalizations indésirables lorsque ce sont des hypothèses auxiliaires.

⁶⁹FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 365. Je souligne.

Autrement dit, il existe une preuve du point lumineux *qui n'utilise pas les intégrales de Fresnel*. Contrairement à ce qu'affirmait Poincaré, celles-ci ne sont donc pas indispensables au succès prédictif de la théorie de Fresnel, bien que ce soient elles qui aient été retenues dans la théorie de Maxwell qui a remplacé celle de Fresnel. Ce simple fait constitue une objection majeure contre le réalisme structural : les équations ne sont pas toujours indispensables pour effectuer une prédiction.

Mais il n'est pas inutile d'entrer un peu plus dans les détails de la dérivation du point lumineux de Fresnel pour mieux comprendre en quoi elle menace la stratégie *divide et impera*.

Fresnel traite d'abord le cas du point obscur qui doit apparaître au centre de la projection d'une ouverture circulaire sur un écran. Il commence par construire un modèle géométrique de l'onde incidente, en supposant que la lumière est composée de rayons discrets et que l'ouverture peut être divisée « par une suite de circonférences concentriques infiniment rapprochées les unes des autres » de manière à ce que chacun des anneaux compris entre deux circonférences ait la même surface⁷⁰ (voir figure 8.3 ci-dessous). La même quantité de rayons passe ainsi à travers chaque anneau et a la même contribution à l'intensité de la lumière sur l'écran.

Fresnel montre ensuite qu'il est possible de bâtir ce modèle géométrique de manière à ce que les rayons qui traversent deux anneaux consécutifs aient une « différence de marche d'une demi-ondulation », c'est-à-dire soient décalés d'une demi-longueur d'onde. Puisque deux rayons qui diffèrent d'une demi-longueur d'onde ont une interférence destructive, cela signifie qu'au centre de la projection de lumière, les rayons provenant d'un anneau seront détruits par les rayons provenant des anneaux qui l'entourent. Fresnel en déduit que selon le nombre d'anneaux du modèle géométrique, on verra apparaître un point lumineux ou un point obscur au centre de la projection :

Par conséquent, tous les rayons envoyés en ce point par deux divisions consécutives se détruiront mutuellement ; et si elles sont en nombre pair, il y aura destruction complète

⁷⁰FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 365.

de toutes les ondes élémentaires qui émanent de l'onde incidente et le centre de la projection de l'ouverture sera privée de lumière. Il en recevra au contraire la plus grande quantité possible, quand la différence de marche entre le rayon central et les rayons extrêmes contiendra un nombre impair de demi-ondulation, puisque alors une de ces divisions restera tout entière pour éclairer le centre de l'ombre⁷¹.

Fresnel propose ensuite l'idéalisation d'une « ouverture circulaire infiniment grande » (voir figure 8.3. Dans une telle situation, les « les vibrations qui émanent de chaque anneau sont détruites par la moitié des vitesses absolues qu'apportent les rayons de l'anneau qui le précède et de celui qui le suit »⁷². La notion de « vitesse absolue » renvoie ici aux particules d'éther mises en vibration par le passage de l'onde lumineuse. Ces vitesses déterminent l'intensité de la lumière comme l'amplitude de l'onde dans la preuve de Poisson.

Fresnel suppose alors que les rayons passant par l'anneau « extrême », situé à l'infini, comptent pour rien. Ainsi, dans le cas d'une ouverture circulaire infiniment grande, seuls les rayons passant par l'anneau central contribuent à l'intensité de la lumière au centre de la projection de l'ouverture, parce que tous les autres anneaux voient leur contribution détruite par les anneaux qui les entourent.

Les rayons qui atteignent le centre de la projection ne proviennent donc que de l'anneau central et la moitié de leur vitesse absolue a été détruite. L'intensité de la lumière étant définie comme proportionnelle au carré de la vitesse absolue des particules d'éther mises en vibration par l'onde lumineuse⁷³, l'intensité au centre de la projection est égale à un quart de l'intensité de la source lumineuse.

Après avoir traité le cas de l'ouverture circulaire infiniment grande,

⁷¹FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 366.

⁷²FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 366.

⁷³Cette définition de l'intensité par rapport à la vitesse absolue des particules d'éther peut sembler étonnante. N'a-t-on pas dit plus haut que l'intensité était, dans le cadre de la théorie ondulatoire, interprétable comme le carré de l'amplitude ? Certes, mais en 1818, Fresnel conçoit encore les ondes lumineuses comme des ondes d'éther longitudinales : l'amplitude de cette onde correspond donc à la vitesse absolue des particules d'éther mises en vibration par son passage.

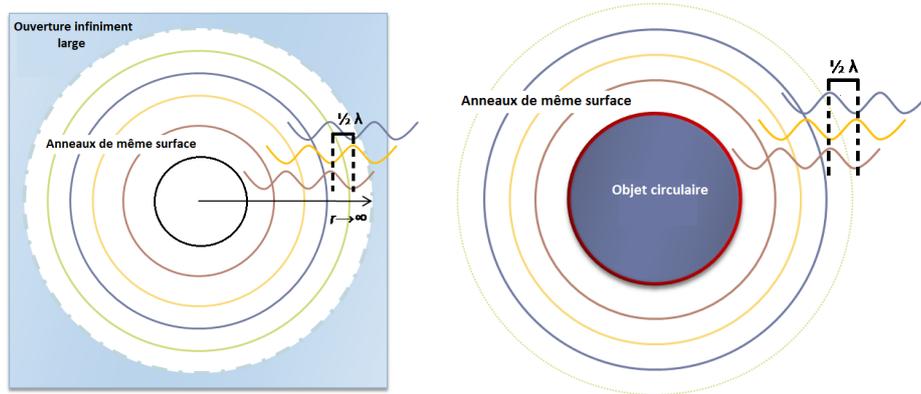


FIGURE 8.3 : À gauche : le modèle géométrique de Fresnel pour une ouverture infiniment large. On peut construire des anneaux de même surface ne laissant passer que des rayons dont la différence de marche est d'une demi-longueur d'onde si l'on fixe le rayon des anneaux selon une suite $\frac{\lambda}{2}(1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots)$ (le schéma ne respecte pas les proportions). L'anneau extrême étant considéré comme étant à l'infini, l'intensité lumineuse au centre de la projection, ne dépend que de la contribution de l'anneau central.

À droite : Le cas d'un écran circulaire. Le modèle est le même que dans pour une ouverture infiniment grande si on le construit de manière à ce que l'anneau qui entoure l'écran circulaire ait la même surface que l'anneau central sur la figure du haut. Le centre de l'ombre sera donc illuminé comme s'il n'y avait pas d'obstacle.

Fresnel peut passer, dans le paragraphe suivant, au cas de la diffraction par un écran circulaire, c'est-à-dire à la prédiction du point lumineux. Il reprend le même modèle géométrique et divise l'onde incidente autour de l'écran en une suite d'anneaux ayant la même surface (voir figure 8.3). On peut donc à nouveau considérer que la contribution de chaque anneau est détruite par les rayons des anneaux qui l'entourent, « en sorte qu'il ne reste plus que la moitié des vibrations des rayons de l'anneau contigu à l'écran »⁷⁴ :

Or cet anneau a la même superficie que le petit cercle central de l'ouverture circulaire ; d'un autre côté, les rayons qu'il envoie au centre de l'ombre ont sensiblement la même intensité que ceux qui émanaient de ce petit cercle central, si du moins leur inclinaison n'est pas trop prononcée ; donc, dans ce cas, le centre de l'ombre d'un écran circulaire doit être autant éclairé que s'il recevait la lumière par une ouverture circulaire indéfinie, c'est-à-dire que s'il n'y avait pas d'écran⁷⁵.

Si l'on reprend l'ensemble de la prédiction du point lumineux par Fresnel, on voit qu'elle procède en trois étapes :

1. On construit un modèle géométrique de la lumière et du système expérimental pour prouver la présence d'un point obscur au centre de la projection d'une ouverture circulaire.
2. On étend ce modèle au cas d'une ouverture infiniment grande, que l'on considère comme équivalent du cas où la lumière ne rencontre aucun obstacle.
3. On montre que le cas du point au centre de l'ombre d'un écran circulaire est identique à celui d'une ouverture infiniment grande.

On aboutit donc au résultat recherché : au centre de l'ombre d'un objet circulaire, l'intensité lumineuse est la même qu'en l'absence d'obstacle. Si l'on dresse la liste des hypothèses qui sont nécessaires pour réaliser cette preuve, on obtient :

⁷⁴FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 368.

⁷⁵FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 368-369.

- *Une définition* : la lumière est composée de rayons qui font vibrer l'éther qui peuvent être diffractés et interférer les uns avec les autres ;
- *Une relation de correspondance* entre l'intensité et la vitesse absolue des particules d'éther ($I \propto |v|^2$).
- *Une hypothèse simplificatrice* : l'écran projetant une ombre est parfaitement circulaire.
- *Une identité* : une ouverture circulaire infiniment large est identique à l'absence d'obstacle.
- *Un modèle géométrique* : l'espace à l'intérieur d'une ouverture circulaire ou autour d'un écran circulaire est divisé en une suite d'anneaux de la même surface au travers desquels passent des rayons dont la différence de marche est d'une demi-ondulation par rapport aux anneaux contigus.

La preuve de Fresnel peut sembler très proche de celle de Poisson. On y retrouve notamment la même hypothèse simplificatrice selon laquelle l'écran est parfaitement circulaire. On peut aussi remarquer que l'identité entre une ouverture infiniment large et l'absence d'obstacle n'est possible que parce que Fresnel admet que « les rayons de l'anneau extrême [d'une ouverture infiniment large] peuvent être considérés comme nuls »⁷⁶, ce qui correspond à la condition aux limites de la preuve de Poisson d'après laquelle à l'infini, la lumière se comporte comme des rayons géométriques. On peut enfin souligner une similitude dans la relation de correspondance qu'utilise Fresnel et celle qu'utilise Poisson : toutes deux indiquent que l'intensité de la lumière est proportionnelle au carré d'une certaine variable, même si chacune interprète cette variable comme un phénomène physique différent.

Cependant, malgré leurs ressemblances, la dérivation du point lumineux par Fresnel et par Poisson diffèrent sur un point central : là où la preuve de Poisson repose sur une *loi* (les intégrales de Fresnel), celle de

⁷⁶FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 368.

Fresnel utilise un *modèle géométrique* qui lui permet de se passer de cette loi. La prédiction de Fresnel correspond à une prédiction guidée par un modèle et non par une loi. C'est pour cela qu'elle a recours à beaucoup plus d'images concrètes qui peuvent nous sembler (et qui semblait peut-être aussi à Fresnel) *fictionnelles*, comme des particules d'éther mises en vibration par une onde. Pourtant, dans le cadre de cette prédiction par un modèle, ces images constituent des hypothèses à part entière, indispensables à la construction du modèle et à la dérivation de la prédiction. La lumière est décrite par ces hypothèses non comme un front d'onde continu, mais comme un faisceau de *rayons* discrets⁷⁷.

Si l'on prend acte des différences des deux processus prédictifs du point lumineux, alors seules les hypothèses communes à la preuve de Fresnel et de Poisson seraient *indispensables* à cette prédiction et dignes de foi d'après la stratégie *divide et impera*. Mais si l'on dresse cette liste d'hypothèses communes, on risque de décevoir les réalistes :

- *Un postulat* : la lumière a certaines caractéristiques périodiques intrinsèques qui lui permettent d'être diffractée et d'interférer.
- *Une relation de correspondance* : l'intensité lumineuse est proportionnelle au carré d'une de ces caractéristiques intrinsèques de la lumière.
- *Une hypothèse simplificatrice* : l'écran projetant une ombre est parfaitement circulaire.
- *Une condition aux limites* : la lumière infiniment loin d'une source de diffraction n'est pas diffractée .

Finalement, ce qu'il y a de plus proche entre ces deux dérivations, ce sont précisément leurs hypothèses auxiliaires idéalisées : bien loin d'être

⁷⁷Cette reformulation de l'optique ondulatoire en termes de rayons avait probablement pour objectif de trouver un terrain d'entente avec les partisans de l'optique corpusculaire. Comte se félicite par exemple, dans la 33^e leçon du *Cours de philosophie positive*, que l'optique ne soit plus embourbée dans des querelles d'hypothèses, précisément parce que la notion de « rayon lumineux » était compatible avec toutes les théories optiques de l'époque.

éliminables par des procédures de désidéalisations, ces hypothèses apparaissent au contraire ici comme ce qui est le moins indispensable pour dériver une prédiction§

S. Psillos est parfaitement conscient que sa stratégie conduit à donner une réalité à des modèles abstraits et idéalisés. Contrairement à d'autres philosophes des sciences, il insiste sur le fait que les abstractions ne peuvent pas être remplacées ou éliminées : « essayez de vous passer d'abstractions et c'est l'objet même des théories scientifiques — les modèles — qui disparaissent avec »⁷⁸. Mais Psillos se facilite la tâche dans cet article, en considérant que les modèles scientifiques ne sont que des objets abstraits et en ne prenant pas en compte les idéalisations qui ne font pas qu'omettre les caractéristiques des systèmes, mais en déforment certaines.

Remarquons que cette liste de postulats indispensables à la dérivation du point lumineux ne nous dit rien sur ces caractéristiques périodiques intrinsèques à la lumière qui lui permettent d'être diffractée et d'interférer, ni laquelle de ces caractéristiques est reliée à l'intensité lumineuse. Une réaliste qui s'engagerait ontologiquement envers cette liste affirmerait l'existence de si peu de choses que l'on peut douter qu'elle ou il soit réellement en désaccord avec une anti-réaliste acceptant que ce que l'on ne peut pas observer ait une réalité, même si elle n'accepte pas que l'on puisse connaître cette réalité.

En résumé, ce que montre la sous-détermination prédictive, c'est que si l'on utilise la procédure *divide et impera*, on en arrive à un réalisme sélectif qui n'a quasiment plus aucun poids ontologique, parce qu'il est très difficile de prouver l'*indispensabilité prédictive* d'un postulat théorique donné. Or, comme je le montre dans la suite de cette section, rien ne permet de penser que la sous-détermination prédictive soit un cas rare.

8.3.3 À la racine de la sous-détermination prédictive

La première constatation que l'on peut faire, c'est que l'histoire de la cosmologie que nous avons retracée dans la deuxième partie de cette

⁷⁸Stathis PSILLOS, "Living with the abstract : realism and models", *Synthese* 180.1 (2011), p. 3–17, p. 17.

thèse révèle plusieurs cas de prédictions ayant joué un rôle majeur qui peuvent être dérivées de processus prédictifs différents :

- La prédiction de l'expansion de l'univers peut être dérivée à la fois du modèle d'univers statique de de Sitter et du modèle d'univers dynamique de Lemaître, deux modèles fondés sur des différentes manières de fixer les paramètres des équations de la relativité générale (voir section 3.2.2).
- La prédiction du fond diffus cosmologique a d'abord été réalisée par Alpher et Herman en 1948 à partir de l'hypothèse de la nucléosynthèse primordiale, puis redécouverte par Dicke et Peebles à partir de l'hypothèse d'un univers cyclique (voir sections 4.1.1 et 4.2.3).
- Les prédictions des anisotropies du fond diffus cosmologique et de l'origine des grandes structures galactiques réalisées par la théorie de l'inflation ont été un succès précisément parce qu'elles pouvaient dérivées dans différents modèles (et donc différentes hypothèses) d'inflation (voir section 5.3.2).

On pourrait, à partir de ces exemples, se contenter de faire une induction historique : il y a fort à parier que si l'on examine attentivement l'histoire de la plupart des prédictions réussies, on se rend compte qu'il existe au moins deux manières alternatives de dériver ces prédictions⁷⁹.

Mais l'exemple des prédictions tirées de la théorie de l'inflation fournit un argument plus convaincant pour prouver que de tels cas de sous-détermination prédictive sont la règle plutôt que l'exception. On a remarqué, dans le chapitre 2 (section 2.2) et dans le chapitre 5 (section 5.4) que certaines prédictions avaient pour caractéristiques d'être *robustes*, c'est-à-dire qu'elles peuvent être dérivées de plusieurs modèles fondés sur la même théorie. Pour le dire autrement : une prédiction est robuste lorsqu'elle ne dépend pas de la manière dont on fixe les paramètres libres d'une théorie.

⁷⁹On peut citer d'autres exemples : la prédiction de l'existence de Neptune fut réalisée par John Adams (1819-1892) en 1843 et Le Verrier en 1846, chacun utilisant des hypothèses et des méthodes différentes. De même, lorsqu'en 1931, Paul Dirac (1902-1984) prédit l'existence du positron (l'antiparticule associée à l'électron), il le fit en utilisant une méthode différente de celle utilisée aujourd'hui.

Dans le système ptoléméen, par exemple, la rétrogradation des planètes n'est pas une prédiction robuste, parce qu'elle dépend de la manière dont on fixe le rayon des orbites et des épicycles planétaires. Si l'on change légèrement ces paramètres, la rétrogradation disparaît. En revanche, dans le modèle copernicien, la prédiction de la rétrogradation est prédite de manière robuste : elle apparaît à la seule condition que la Terre dépasse ou soit dépassée par une autre planète à un moment de leurs révolutions respectives, quelle que soit la période et la taille de son orbite. C'est donc une prédiction *très* robuste, qui ne dépend pas d'un ensemble de paramètres fixés à l'avance, mais qui découle de la manière dont le modèle est construit.

On peut étendre cette notion de robustesse à toutes les prédictions si l'on considère qu'un résultat prédit apparaîtra d'autant plus robuste qu'il est possible de le prédire de différentes manières dans le même cadre théorique. Ainsi, pour un contemporain de la théorie de Fresnel, le fait qu'il existe deux prédictions différentes du point lumineux ne devait pas sembler être un défaut de cette théorie mais au contraire devait renforcer le sentiment que cette prédiction découle *naturellement* de cette théorie, qu'il ne s'agissait pas d'un artefact mathématique lié à la manipulation d'équations et d'approximations. La robustesse de cette prédiction devait donc apparaître comme une preuve en faveur de cette théorie.

Si les scientifiques sont incitées à rechercher différentes preuves des mêmes prédictions pour augmenter leur robustesse et ainsi la confirmation de leurs théories, elles ont donc intérêt à trouver différents raisonnements prédictifs menant au même résultat. Et chacun de ces nouveaux raisonnements prédictifs est une preuve contre l'indispensabilité prédictive de certaines des hypothèses qui constituent ces théories. Ainsi, plus on cherche à donner une confirmation robuste à une théorie, moins on a de chance de pouvoir lui appliquer la stratégie *divide et impera*. Pour le dire dans une formule ramassée : plus on développe une théorie, plus on se rend compte qu'il existe différentes routes allant de la théorie aux données et que ces routes ne passent pas toutes par les mêmes hypothèses.

8.3.4 La portée de l'argument du miracle

Les problèmes relevés ci-dessus pour interpréter l'argument du miracle comme un argument d'indispensabilité ne signifient pas pour autant que la stratégie *divide et impera* n'a aucun intérêt. Elle peut être utilisée pour montrer quelles parties des théories passées sont compatibles avec nos théories présentes. Elle permet ainsi de reconstruire une histoire des sciences qui montre un *progrès* des connaissances théoriques, *du point de vue de nos théories actuelles*. Mais une telle reconstruction ne peut être faite que si l'on adopte ce point de vue mais ne peut nous assurer que ces théories sont vraies ou partiellement vraies.

En effet, pour pouvoir prouver que nos théories actuelles sont partiellement vraies, il faudrait être capable d'appliquer la stratégie *divide et impera* à nos théories actuelles. Or elle n'est applicable qu'aux théories passées. Si l'on voulait, par exemple, affirmer que la prédiction du point lumineux prouve que ce sont les intégrales de Fresnel qui sont vraies et non le modèle géométrique utilisé par Fresnel dans sa propre dérivation, alors le seul argument que l'on peut proposer est le suivant : les intégrales de Fresnel ont été conservées dans nos théories actuelles, or celles-ci sont vraies ou approximativement vraies, donc les intégrales de Fresnel sont vraies ou approximativement vraies. Mais on voit bien que dans un tel raisonnement, on accorde la vérité de nos théories actuelles, ce que doit précisément prouver l'argument du miracle. On fait donc une pétition de principe.

On pourrait estimer qu'admettre que l'histoire des sciences puisse être reconstruite comme un progrès vers la vérité est déjà, en soi, un fait suffisamment étonnant que le réalisme scientifique est la seule philosophie à pouvoir expliquer. Ce serait en effet le cas si l'on pouvait montrer que tous les succès des théories passées sont dus à des hypothèses que l'on retrouve comme cas particuliers de nos théories actuelles, comme c'est le cas pour les intégrales de Fresnel-Kirchhoff, que l'on retrouve comme un cas particulier des équations de Maxwell.

Mais, très souvent, on doit se contenter d'expliquer le succès des théories passées sans pouvoir les subsumer sous nos théories actuelles. Par

exemple, la théorie de l'inertie circulaire de Descartes⁸⁰ est au fondement du modèle astronomique des tourbillons présenté dans le troisième livre des *Principes de philosophie* et ce modèle prédit correctement que toutes les planètes tournent autour du Soleil dans la même direction⁸¹ (voir figure 8.4). Ce succès prédictif est difficile à expliquer, puisque ni la théorie de l'inertie circulaire ni le modèle des tourbillons ne font encore partie de notre image scientifique du monde : on ne peut pas les déduire comme cas particuliers de nos théories actuelles.

Pour expliquer ce succès de Descartes du point de vue de nos théories actuelles, on doit se contenter de dire qu'il y a *quelque chose* de vrai dans le modèle des tourbillons. En effet, d'après le scénario généralement admis en astronomie, le système solaire a eu pour origine un nuage de poussières qui, sous l'effet de sa propre force gravitationnelle, s'est effondré et a pris la forme d'un disque à partir duquel les planètes se sont constituées par accréation. On peut expliquer ainsi qu'elles tournent toutes dans la même direction. Ce disque d'accréation ressemblant *vaguement* au modèle des tourbillons, cela expliquerait pourquoi la prédiction de Descartes a réussi.

Cependant, si l'on admet ce type d'explication comme étant des reconstructions satisfaisantes du progrès scientifique, je doute que l'on puisse trouver un seul exemple de succès prédictif passé qui puisse être incompatible avec nos connaissances actuelles, parce qu'il est difficile d'imaginer aucune théorie passée si absurde qu'elle n'ait pas un quelconque rapport avec notre image scientifique du monde. Le fait de pouvoir reconstruire l'histoire des théories passées comme un progrès vers la vérité, dans de telles conditions, n'a donc rien d'étonnant.

En définitive, il semble impossible d'utiliser les succès prédictifs à la fois comme un argument pour prouver la vérité des théories actuelles et comme un critère intra-théorique pour déterminer quelles hypothèses de ces théories sont vraies. Autrement dit, il n'est pas possible de définir suffisamment précisément la notion de vérité partielle pour pouvoir affirmer quelles sont les hypothèses scientifiques actuelles qui sont vraies.

⁸⁰René DESCARTES, *Principia philosophiae*, Amsterdam, Ludovicum Elzevirium, 1644, II, §33.

⁸¹DESCARTES, *Principia philosophiae*, III, §30.

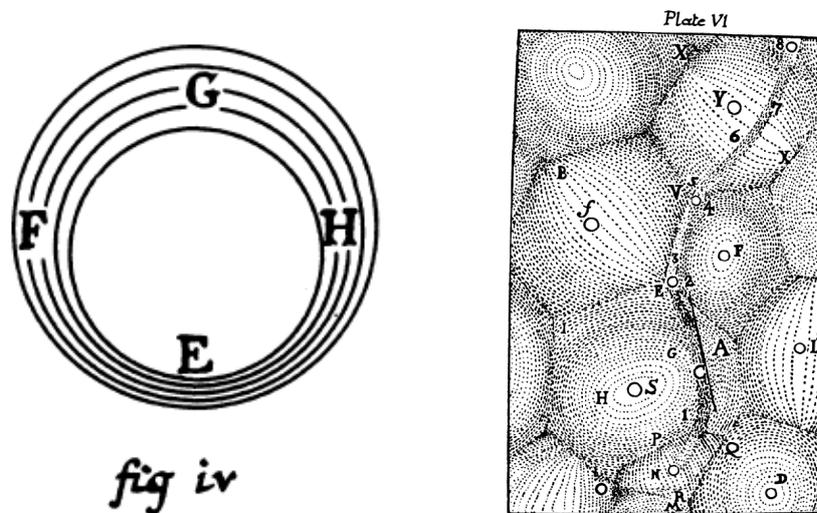


FIGURE 8.4 : À gauche : la théorie de l'inertie circulaire de Descartes. N'admettant pas l'existence du vide, Descartes développe une théorie de l'inertie d'après laquelle tout déplacement d'un corps est immédiatement compensé par le déplacement d'un autre corps venant prendre la place du premier. Les mouvements de matière forment ainsi des anneaux.

À droite : le modèle des tourbillons. Cette théorie de l'inertie circulaire mène Descartes à développer un modèle astronomique dans lequel chaque étoile (comme le Soleil, noté *S*) est au centre d'un tourbillon de matière qui entraîne les révolutions des planètes. Source : René DESCARTES, *Principia philosophiae*, Amsterdam, Ludovicum Elzevirium, 1644.

On peut donc dès à présent répondre à la question posée au début de ce chapitre : quelle est la portée de l'argument du miracle ? Est-ce une preuve de la vérité de certaines théories et de certains aspects de ces théories ? Ou n'est-ce qu'une intuition qu'il s'agit de clarifier ? Comme on vient de le voir, l'argument du miracle, comme inférence à la meilleure explication et comme argument d'indispensabilité, rencontre de sévères problèmes qui ne sont pour l'instant pas résolus : il semble donc que l'interprétation la plus adaptée de cet argument soit celle de Duhem, c'est-à-dire comme une intuition.

On pourrait rétorquer que les problèmes que j'ai soulevés n'ont attaqué que la stratégie *divide et impera* et qu'il n'est pas impossible qu'une autre procédure pour définir la vérité partielle des théories réussisse là où la stratégie de S. Psillos a échoué. C'est pourquoi je développe dans la section suivante un argument fondé non pas sur les *prédictions scientifiques*, mais sur la *prédictibilité du changement scientifique*, argument qui s'applique à toute procédure visant à distinguer entre les parties vraies et les parties fausses des théories.

8.4 Le réalisme prospectif et l'imprédictibilité de la science

On pourrait s'étonner que, dans cette thèse consacrée aux prédictions, on ne se soit pas intéressé directement au problème de l'*imprédictibilité* : qu'en est-il des systèmes scientifiquement imprédictibles, comme les phénomènes quantiques ou de chaos déterministes ? En quoi sont-ils imprédictibles ?

La raison de ce silence est qu'il me semble que cette question est un problème de scientifique et non de philosophe. On peut étudier pourquoi, d'après nos théories actuelles, l'évolution de certains systèmes ne peut être prédite ; mais rien ne nous permet d'affirmer, d'un point de vue philosophique, que nous ne serons pas demain capables de prédire le comportement de ces mêmes systèmes. Nous avons vu dans le deuxième chapitre de cette thèse que les sciences naturelles historiques, que l'on considère traditionnellement comme des disciplines explicatives et non

prédictives, sont aujourd’hui capables de réaliser des prédictions guidées par des modèles ou des données : imposer une limite philosophique au progrès scientifique me semble donc bien téméraire⁸².

Ainsi, si je n’ai pas abordé les problèmes d’imprédictibilité jusqu’à présent, c’est parce que je considère qu’il y a un processus qui, lui, est bien imprédictible : l’évolution future des sciences. Or, tout réalisme *sélectif*, qui prétend pouvoir déterminer quelles parties de nos théories actuelles sont vraies, est aussi un réalisme *prospectif* qui prétend pouvoir prédire que ces parties vraies se maintiendront dans les futures théories. En effet, quelle que soit la procédure que l’on utilise pour identifier les vrais aspects d’une théorie, si elle est applicable à nos théories actuelles, elle rend l’avenir de la science en partie prédictible parce qu’elle impose que ces aspects soient retenus dans les théories futures. Au contraire, comme l’a remarqué K. Stanford, si une réaliste était incapable de prédire quels aspects de nos théories actuelles survivront aux prochaines révolutions scientifique et uniquement capable de désigner *a posteriori* quels sont les aspects vrais des théories passées, ce serait un « coup majeur au réalisme [...] parce que c’est ce à quoi la réaliste tient le plus »⁸³.

Dans cette section, je m’efforce de montrer que l’imprédictibilité de la science implique que le réalisme prospectif est une position loin d’être modeste et fort téméraire.

⁸²Popper propose une preuve l’impossibilité de toute prédiction sur la croissance de nos connaissances objectives dans *The Open universe*. Voir Karl POPPER, *The Open Universe : An Argument for Indeterminism*, Londres, Routledge, 1988, p. 62-81.

Cet argument est destiné, selon Popper, à *réfuter* l’historicisme en prouvant que l’évolution historique des sciences n’est pas prédictible. Même si je partage cette thèse avec Popper, je pense que cet argument ne permet pas de conclure en outre, comme il le prétend, que le déterminisme scientifique soit un idéal inatteignable dans les sciences de la nature : si l’on ne peut pas prédire à quoi ressembleront nos théories futures, alors rien ne nous permet de croire qu’elles ne pourront pas réaliser des prédictions déterministes (rien ne nous permet, non plus, de soutenir l’inverse).

De plus, la preuve de Popper repose sur le concept d’« auto-prédicteur », c’est-à-dire un système capable de réaliser des prédictions sur son propre savoir futur. Dans cette section je présente un argument qui se passe de ce concept, parce que l’on pourrait très bien objecter à Popper que ce ne sont pas les scientifiques qui essaient de prédire l’avenir de la science, mais les philosophes, historiens et sociologues des sciences.

⁸³P. Kyle STANFORD, “Author’s Response”, in ‘Grasping at Realist Straws’, a Review Symposium of Stanford (2006)”, *Metascience* 18 (2009), p. 355–390, p. 387.

8.4.1 La témérité du réalisme prospectif

Même si l'on soutient que nos théories actuelles sont approximativement et partiellement vraies, la conception prudente de l'avenir de la science est la suivante :

Il est fort probable que *toutes* nos connaissances scientifiques actuelles (empiriques et théoriques) dans un domaine donné ne seront pas éliminées par la prochaine révolution scientifique affectant ce domaine. Il est aussi fort probable que certaines de ces connaissances disparaîtront et seront remplacées — ou du moins complètement transformées — lors de cette révolution. *Mais nous ne savons pas lesquelles de ces connaissances seront conservées et lesquelles seront éliminées.*

Toute position qui attribue une vérité et donc un caractère *définitif* à certains aspects précis de nos théories actuelles, est téméraire, parce qu'elle va plus loin que cette position prudente.

Or, si l'on admet qu'une procédure peut circonscrire quels aspects de nos théories présentes sont vraies, on est engagé envers le raisonnement suivant :

On peut savoir quelles parties de nos théories actuelles sont vraies.

Ces parties étant vraies, elles sont définitives.

Donc nous savons quelles connaissances scientifiques actuelles seront conservées dans le futur.

Ainsi, toute argumentation réaliste qui repose sur des arguments d'indispensabilité prétendant déterminer quelles hypothèses ou quels aspects de nos théories actuelles sont vrais aboutissent à une forme de réalisme prospectif qui va plus loin que cette position prudente.

Par exemple, pour le philosophe des sciences Iannos Votsis, cette attitude prospective est une conséquence de tout réalisme cohérent : si « les parties des théories passées qui ont connu des succès ne sont identifiables que rétrospectivement, c'est-à-dire comme celles qui ont survécu,

alors l'approche réaliste est trivialisée »⁸⁴ et c'est pourquoi les réalistes doivent faire de telles « audacieuses prédictions concernant le cours futur de la science »⁸⁵. Étant un réaliste structural, il tente ainsi de démontrer qu'il est possible d'identifier une « interprétation minimale de la partie mathématique »⁸⁶ des théories nécessaires pour réaliser une prédiction et que l'on peut prédire que cette structure mathématique minimale se retrouverait dans les théories futures.

I. Votsis a tout a fait raison de remarquer que le réalisme sélectif doit être prospectif pour ne pas être trivial : mais la prédiction que les structures mathématiques de nos théories actuelles se conserveront, aussi audacieuse soit-elle, a de fortes chances d'échouer. En effet, la structure mathématique des théories a fortement évolué au cours des révolutions scientifiques passées et même en dehors de ces épisodes de révolution. Marion Vorms a ainsi montré que les différentes versions de la mécanique classique ne sont pas indépendantes de leur contenu et que ces différentes formulations n'ont pas les mêmes conséquences⁸⁷. On peut à plus forte raison suspecter que les résultats de la mécanique quantique et de la relativité générale seront reformulés dans un formalisme mathématique nouveau si une nouvelle théorie parvient à les unifier et à réaliser des méta-prédictions susceptibles de la confirmer.

Dans ce qui suit, je m'efforce de montrer que l'on ne peut pas prédire quels aspects de nos théories actuelles vont survivre aux prochaines révolutions scientifiques, même si l'on sait que certains vont se retrouver dans les théories futures.

8.4.2 Prédictions fécondes et avenir de la science

On pourrait s'étonner que je soutienne ici que l'avenir de la science n'est pas, même partiellement, prédictible, alors que j'ai proposé, dans la troisième partie de cette thèse, une conception de la confirmation insistant sur la fécondité des prédictions, c'est-à-dire sur des prédictions qui per-

⁸⁴VOTSIS, "The prospective stance in realism", p. 1223.

⁸⁵VOTSIS, "The prospective stance in realism", p. 1231.

⁸⁶VOTSIS, "The prospective stance in realism", p. 1229.

⁸⁷VORMS, "Théories, modes d'emploi. Une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques", p. 159.

mettent aux scientifiques de juger que la capacité prédictive d'une théorie peut s'accroître dans le futur. Cette conception de la confirmation semble présupposer que l'avenir d'une théorie puisse être en partie prédit de manière rationnelle, sinon le choix théorique des scientifiques fondé sur ces prédictions fécondes ne serait qu'une décision irrationnelle.

Cependant, comme on l'a indiqué dans le chapitre 4 (section 4.1.3), on ne peut pas juger de la capacité prédictive d'une théorie *a priori* et *en principe* : c'est seulement *a posteriori* et *en pratique* que l'on peut voir jusqu'où s'étend cette capacité prédictive, en réalisant des prédictions et en les testant. Certes, il est possible d'estimer cette capacité à partir des vertus épistémiques de simplicité, de précision, d'étendue et de plausibilité des hypothèses auxiliaires (voir chapitre 7, section 7.3.3) mais ces vertus ne peuvent être mesurées de manière précise et univoque. Tout ce que l'on peut faire, c'est estimer, en examinant un processus prédictif et son résultat, que certaines de ces vertus n'ont pas été sacrifiées et qu'il n'y pas d'obstacle au développement de la capacité prédictive d'une théorie. Mais grâce à quels éléments de cette théorie et jusqu'où ce développement va se poursuivre, cela n'est pas une question à laquelle les prédictions fécondes peuvent répondre. C'est pourtant la question à laquelle on devrait répondre si l'on voulait prédire quelles parties de nos théories scientifiques vont se conserver dans nos théories futures.

De plus, il faut distinguer l'avenir d'une *théorie* (ou d'un programme de recherche) et l'avenir de la *science*, (ou d'une discipline scientifique). Imaginons par exemple une théorie cosmologique de l'inflation qui, sans hypothèses auxiliaires complexes et improbables, réalise une prédiction des anisotropies du fond diffus cosmologique avec une précision inégalée et qui permette en outre d'expliquer et de mesurer la présence de matière noire dans l'univers. Cette prédiction serait une prédiction féconde parce qu'elle montrerait que rien n'empêche que la capacité prédictive de cette théorie puisse être étendue à d'autres problèmes, comme par exemple la formation des structures galactiques. Mais cette prédiction n'empêcherait pas que l'on puisse faire des découvertes imprévues et surprenantes mettant en péril cette théorie. Si l'on détectait directement des particules de matière noire moins massives que celles prédites, cela

demanderait de nouveaux ajustements de cette théorie. Elle n'empêcherait pas non plus l'apparition de théories rivales, comme par exemple un modèle non isotrope et non homogène de l'univers⁸⁸, pouvant réaliser les mêmes prédictions tout en se passant de l'hypothèse de l'inflation.

Autrement dit, une prédiction féconde permet de juger si une théorie peut développer sa capacité prédictive (et dans quelle direction elle peut la développer), mais elle ne permet bien évidemment pas de prédire les crises inattendues qui peuvent secouer une discipline et provoquer une révolution scientifique. Donc, la conception de la confirmation que j'ai développée dans la troisième partie de cette thèse ne permet en aucun cas de penser que l'on puisse prédire à quoi ressembleront les futures théories issues de ces révolutions scientifiques. Or c'est cette prétention qu'a le réalisme sélectif et que l'on peut qualifier de téméraire.

8.4.3 Une histoire des sciences prédictive est-elle possible ?

Que l'on ne puisse pas prédire l'avenir de la science ou d'une discipline scientifique au point de savoir quels éléments de nos théories présentes subsisteront dans les théories futures semble être un fait actuellement indéniable. Aucune des disciplines qui a la science pour objet, que ce soit l'épistémologie, la sociologie des sciences ou l'histoire des sciences, ne propose *actuellement* des prévisions fiables de ce à quoi ressemblera l'état de nos connaissances et notre image scientifique du monde dans cinq, dix ou trente ans.

Cependant, il existe, dans certains domaines des *lois* qui concernent l'avenir de la science, comme par exemple la loi de Moore qui, depuis 1975, a prédit avec plus ou moins de succès le doublement du nombre de transistors par microprocesseur tous les deux ans. De même, en astronomie, on constate que le diamètre des télescopes a plus ou moins doublé

⁸⁸De tels modèles existent et auront peut-être un jour une grande capacité prédictive, si l'on trouve des moyens mathématiques de les développer et les moyens techniques de les tester. Voir par exemple Thomas BUCHERT, "A Cosmic equation of state for the inhomogeneous universe : can a global far-from-equilibrium state explain dark energy ?", *Classical and Quantum Gravity* 22 (2005), p. 113–119.

tous les cinquante ans depuis l'invention du premier télescope à réflexion par Newton en 1668.

De telles lois sont imprécises et incertaines : on estime que l'on ne peut pas les extrapoler au-delà d'une vingtaine d'années. En outre, elles concernent plus les *technologies* que les connaissances scientifiques. Mais elles prouvent qu'une certaine dimension technique de la science semble progresser sans se soucier des irrégularités et des soubresauts des révolutions scientifiques (on montre dans le chapitre suivant toute l'importance de ce constat). De plus, elles permettent de se demander si des lois équivalentes ne pourraient pas être trouvées en histoire des sciences, dotant cette discipline d'une certaine capacité prédictive. Autrement dit, même si *de fait* aujourd'hui l'histoire des sciences n'est pas prédictive, qu'est-ce qui lui empêcherait de le devenir demain ? Y a-t-il quoi que ce soit qui empêche cette discipline, ou tout autre discipline qui étudie le changement scientifique, de devenir prédictive ?

J'ai commencé cette section en affirmant qu'il n'y avait aucun moyen de juger qu'un système soit *en droit* imprédictible et donc qu'on ne peut identifier de limite *a priori* qui empêcherait une science de devenir, à l'avenir, prédictive. On ne voit pas pourquoi l'histoire des sciences échapperait à ce constat. Dans le cycle de romans de science-fiction *Fondation*, l'écrivain Isaac Asimov (1920-1992) imagine une science appelée « psycho-histoire » qui, à l'aide de modèles mathématiques complexes, est capable de prédire l'évolution sur le long terme des sociétés humaines. Rien ne permet de dire qu'une telle science est impossible, surtout avec le développement des prédictions guidées par l'utilisation de données massives. Ainsi, même si une discipline capable de prédire l'évolution des sciences paraît aujourd'hui très improbable, elle ne semble pas impossible *en droit*. Dans cette perspective, le réalisme prospectif n'apparaîtrait pas comme une position téméraire, mais au contraire comme une tentative louable pour édifier une discipline prédictive ayant le changement scientifique pour objet.

Cependant, même si une discipline pouvait prédire l'histoire des sciences, on ne pourrait toujours pas être assuré de pouvoir prédire quels éléments de nos théories actuelles survivront dans les théories futures. En effet,

imaginons que nous disposions d'une méta-théorie T^* dont l'une des hypothèses H^* prédise quelles hypothèses H de la théorie actuelle T survivront dans la théorie postérieure T' . Même si T^* a été bien confirmée, rien ne nous dit qu'elle ne sera pas elle-même remplacée par une autre méta-théorie T^{**} dans laquelle H^* n'apparaîtra pas. Autrement dit, pour savoir quelles hypothèses H de T seront conservées dans T' , il faudrait savoir quelles hypothèses H^* de T^* seront conservées dans T^{**} . Et l'on serait ainsi entraîné dans une régression à l'infini.

En effet, même si l'on trouve une théorie qui permette de prédire quelles parties de nos théories scientifiques doivent être conservées à travers les révolutions scientifiques, rien ne nous permet d'affirmer que cette théorie sera une *théorie finale* qui ne sera jamais réfutée. Il est donc tout à fait possible qu'elle soit dépassée par une nouvelle théorie qui n'en retiendra que certaines hypothèses et fera de nouvelles prédictions. Si l'on veut savoir lesquelles de ces hypothèses seront conservées, alors il faudrait une théorie d'un niveau encore supérieur qui prédise comment évoluent les théories du changement scientifique. Mais puisque l'on pourrait appliquer le même raisonnement à cette « méta-méta-théorie », on est entraîné dans une régression à l'infini.

Donc, même si l'histoire et la sociologie des sciences devenaient des disciplines prédictives, cela n'empêcherait pas à l'avenir de la science d'être imprédictible : on aurait juste fait remonter cette imprédictibilité d'un niveau, puisque ce serait l'avenir de cette histoire des sciences prédictive qui serait maintenant imprédictible.

8.4.4 Le prospectivisme négatif de P. Vickers

On pourrait trouver que l'on pousse le scepticisme un peu loin et qu'une telle prudence est excessive. Il semblerait que l'on puisse faire certaines prédictions *négatives* sur l'avenir des sciences, qui concernent non pas quels éléments apparaîtront dans nos théories futures, mais quels éléments *n'y apparaîtront pas*. Ne peut-on pas affirmer sans trop de risque que la notion d'*entéléchie*, par exemple, ne risque pas de réparaître dans les théories biologiques à venir, parce que le mécanisme de l'évolution par sélection naturelle permet de rendre plus précisément compte de l'adapta-

tion des corps vivants et est plus cohérente avec d'autres sciences comme la physique ?

De telles prédictions négatives semblent plus prudentes que les prédictions positives de certains réalistes prospectifs comme I. Votsis. Or, d'après P. Vickers, les réalistes n'ont pas besoin de proposer d'autres prédictions que celles-ci pour répondre aux objections anti-réalistes tirées de l'histoire des sciences. Il considère en effet qu'il faut dissocier deux projets réalistes : « (i) le projet de répondre à l'objection historique [l'induction pessimiste], et (ii) le projet d'expliquer envers quoi les réalistes devraient s'engager »⁸⁹.

Pour accomplir cette première tâche, les réalistes n'ont pas besoin de montrer quels aspects de nos théories actuelles sont vrais, mais uniquement de montrer que certains aspects de nos théories actuelles et passées ne sont pas indispensables à leur succès :

Lorsqu'une objection historique est avancée, la réaliste peut y répondre en montrant que les hypothèses spécifiques en question ne méritent pas d'engagement réaliste (en restant silencieux sur celles qui le méritent)⁹⁰.

L'exemple que prend celui de P. Vickers est celui du modèle atomique de Bohr, qui lui permit de prédire les raies spectrales de l'hydrogène, alors même que ce modèle était faux puisqu'il représentait les électrons en *orbite* autour du noyau (on sait à présent que les électrons, comme toutes les particules quantiques, ne sont pas localisables sur des orbites). Or, l'hypothèse qui est responsable du succès prédictif du modèle de Bohr est celle-ci :

H : les électrons orbitent autour du noyau avec des énergies spécifiques et quantifiées, correspondant à certaines trajectoires orbitales « permises »⁹¹.

D'après P. Vickers, cette hypothèse n'a de succès prédictif qu'en vertu d'une autre proposition qu'elle implique qui, elle, ne pose aucun pro-

⁸⁹Peter VICKERS, "Understanding the selective realist defence against the PMI", *Synthese* (2016), publication en ligne, p. 2.

⁹⁰VICKERS, "Understanding the selective realist defence against the PMI", p. 9.

⁹¹VICKERS, "Understanding the selective realist defence against the PMI", p. 6.

blème aux réalistes parce qu'elle est cohérente avec nos connaissances scientifiques actuelles :

H^* : l'électron peut seulement occuper certains niveaux d'énergie spécifiques et quantifiés à l'intérieur de l'atome⁹².

Autrement dit, H n'étant pas réellement indispensable au succès du modèle de Bohr, on aurait dû s'attendre à ce qu'elle ne soit pas retenue dans les modèles ultérieurs de l'atome, ce qui fut bien le cas. L'argument de P. Vickers est donc le suivant : pour répondre aux cas historiques problématiques pour le réalisme scientifique, il faut et il suffit de montrer que certains aspects de nos théories sont dispensables et de prédire qu'ils disparaîtront lors de prochaines révolutions scientifiques.

Mais cette conclusion de P. Vickers me semble aller trop vite. Même si l'on peut identifier une hypothèse dispensable ou auxiliaire dans une théorie, on ne peut pas prédire qu'elle *va* disparaître, mais uniquement qu'elle *peut* disparaître : rien ne force les scientifiques à s'en débarrasser. Ils peuvent la conserver si elle a d'autres vertus prédire un phénomène. Elle peut par exemple être explicative ou utile heuristiquement et pédagogiquement.

Le cas de la prédiction du point lumineux par Fresnel illustre cette possibilité. Comme on l'a vu dans la section 3, les équations de Fresnel n'étaient pas indispensable pour réaliser cette prédiction. Et pourtant, elles ont survécu dans la théorie optique de Maxwell, parce que leur forme mathématique les rendait déductibles des équations de Maxwell.

P. Vickers a donc raison d'insister sur le fait que les réalistes n'ont pas besoin de chercher envers quelles parties des théories scientifiques ils sont ontologiquement engagés pour répondre aux défis posés par l'histoire des sciences (dans le chapitre suivant, on montre qu'effectivement les réalistes devraient s'abstenir d'avoir de tels engagements), mais montrer qu'une hypothèse n'est pas indispensable au succès d'une théorie ne permet pas de prédire que cette hypothèse sera éliminée lors des prochaines révolutions scientifiques.

L'argument de P. Vickers ne permet donc pas de faire de prédictions négatives sur l'avenir de la science, mais fournit en revanche, comme il

⁹²VICKERS, "Understanding the selective realist defence against the PMF", p. 6.

le revendique, « une méthode heuristique à garder à l'esprit quand nous (les scientifiques en particulier) cherchons à savoir comment des progrès scientifiques peuvent être réalisés »⁹³. Dans ce qui suit, j'expose l'idée qu'il est contre-productif d'essayer de juger de l'avenir de la science d'un point de vue philosophique surplombant.

8.4.5 L'avenir de la science : une affaire de scientifiques

L'imprédictibilité de l'avenir des sciences doit être prise au sérieux, notamment dans le débat sur le réalisme scientifique. La leçon de l'histoire des sciences n'est pas tant, comme le voudrait l'induction pessimiste de L. Laudan, que nous soyons certains que nos théories actuelles vont se révéler fausses, mais plutôt que les contemporains d'une théorie ne savent pas à quoi ressemblera la théorie qui la remplacera. Ce n'est que *rétrospectivement* que l'on peut identifier, dans une théorie passée, ce qui a fait son succès *du point de vue de notre théorie présente*.

Mais les scientifiques eux-mêmes ne se prêtent-ils pas à des prédictions sur l'avenir des sciences ? Ne sait-on pas dès aujourd'hui par exemple, que la théorie scientifique qui remplacera la relativité générale et la mécanique quantique sera une théorie de la gravitation quantique, capable de rendre compte de phénomènes impliquant de grandes masses à des échelles quantiques comme les trous noirs ou le big bang ?

Certes, on sait que ce sont les objectifs que se donnent aujourd'hui les physiciens qui travaillent sur une telle unification de la relativité générale et de la mécanique quantique. Mais on ne peut pas prédire aujourd'hui quelles hypothèses constitueront cette future théorie ni même quelle sera sa structure mathématique. Dans les années 1990, la notion de « théorie finale » était un sujet de débat courant en physique théorique. Mais même S. Weinberg, un de ceux qui l'avait mise en avant, reconnaissait :

Il est hasardeux de supposer que l'on sait ne serait-ce que les termes dans lesquels cette théorie finale sera formulée.
Richard Feynman s'est un jour plaint que les journalistes lui

⁹³VICKERS, "Understanding the selective realist defence against the PMF", p. 11.

posaient des questions sur les théories futures en termes de particule ultime ou d'unification finale de toutes les forces, alors qu'en réalité nous ne savons pas s'il s'agit des bonnes questions⁹⁴.

Je ne saurais mieux formuler l'attitude prudente à l'égard du futur de la science que ne le fait Feynman dans ces propos rapportés par S. Weinberg.

Ces propos de Feynman permettent de mettre en lumière un nouvel argument en faveur de l'imprédictibilité de l'évolution théorique des sciences : si l'on pouvait déterminer quels éléments de nos théories actuelles sont indispensables et donc doivent être retenus dans les théories futures, alors on briderait l'invention et le développement de nouvelles théories. En effet, pour résoudre un problème scientifique, on ne peut pas, d'un point de vue philosophique en tout cas, déterminer à l'avance quelles données du problème doivent ou ne doivent pas être remises en questions.

Bien souvent, les révolutions scientifiques naissent de nouvelles reformulation des théories admises : c'est ainsi qu'Einstein a utilisé la reformulation de la dynamique newtonienne par Poisson qui fait intervenir la notion de champ pour développer sa théorie de la relativité générale et ses conséquences cosmologiques (voir chapitre 3, section 3.1.1) ou que Fresnel a reformulé l'optique ondulatoire de Huygens et de Young pour bâtir sa théorie sur le principe selon lequel chaque point d'un front d'onde se comporte comme une source lumineuse secondaire⁹⁵. Autrement dit, il faut laisser la liberté aux scientifiques d'identifier par eux-mêmes quels sont les éléments d'une théorie passée qu'ils veulent conserver dans une théorie future, sinon on les empêche de reformuler leur cadre théorique d'une manière qui leur permette de voir les problèmes sous un nouveau jour et d'accoucher de nouvelles théories.

En conclusion, il n'est donc pour l'instant ni possible ni souhaitable de définir un réalisme sélectif cohérent, c'est-à-dire qui soit prospectif. Cela ne devrait pas surprendre : si l'on pouvait réellement définir un tel réalisme prospectif, on aurait résolu le problème de l'induction, puisque

⁹⁴Steven WEINBERG, *Dreams of a final theory*, Pantheon Books, 1992, p. 172.

⁹⁵C'est Fresnel qui donne à ce principe le nom de « principe de Huygens ».

l'on aurait trouvé une manière de savoir lesquelles de nos hypothèses scientifiques sont définitives et garantissent les prédictions qui en sont tirées. En définitive, le débat sur le réalisme sélectif et la vérité partielle des théories se ramène donc à la question de savoir si le problème de l'induction est un problème que l'on peut espérer résoudre ou s'il reflète un fait épistémologique fondamental : notre connaissance empirique est structurée de telle manière qu'elle n'évolue qu'en se remettant perpétuellement en cause. Pour toutes les raisons que j'ai évoquées dans cette section, il me semble que c'est cette deuxième interprétation du problème de l'induction qui est correcte. Notre conception de la connaissance scientifique devrait donc, à l'inverse des réalismes prospectifs, éviter de concevoir le cours des sciences un processus prédictible.

8.5 Conclusion du chapitre

Le principal objectif de cette thèse est d'examiner la portée des succès prédictifs et notamment de savoir s'ils peuvent nous assurer que les théories scientifiques ayant connu de tels succès sont vraies ou partiellement vraies. Nous pouvons à présent apporter les premiers éléments de réponse à cette dernière question.

Le plus souvent, on utilise ces succès prédictifs dans le cadre de l'argument du miracle, c'est-à-dire pour prouver que seule la vérité peut expliquer ces succès. Mais, dans ce chapitre, on a montré qu'une telle preuve doit faire face à plusieurs objections :

- Les prédictions réussies qui semblent ne pouvoir être expliquées que par un appel à la vérité ne peuvent être réalisées que si elles s'accompagnent d'idéalisations et d'approximations, c'est-à-dire d'hypothèses fictionnelles ou irréalistes : c'est le *dilemme des réalistes* exposé dans la section 8.2.
- On ne peut donc pas admettre que *toutes* les hypothèses qui accompagnent un succès prédictif soient vraies ou approximativement vraies. Mais le *problème de la sous-détermination prédictive* présenté dans la section 8.3 montre qu'on ne peut pas défi-

nir précisément la vérité partielle d'une théorie à partir de celle d'*indispensabilité prédictive*.

- Enfin, comme on l'a vu dans la section 8.4, toute argumentation réaliste fondée sur un argument d'indispensabilité aboutit à un réalisme prospectif qui doit faire face au fait que l'évolution des sciences est *imprédictible*.

On est donc ramené à interpréter l'argument du miracle comme le faisait Duhem, c'est-à-dire comme une intuition, un instinct ou un biais cognitif qui nous pousse à croire que nos théories ne sauraient être totalement fausses si elles prédisent ou auraient pu prévoir des lois empiriques ou des phénomènes. Cet instinct ou intuition n'est pas à prendre à la légère : il a une effectivité et une réalité. Mais pour Duhem, nous sommes impuissants à le justifier et à le clarifier : il s'impose à nous comme les évidences pascaliennes du cœur s'imposent à la raison.

Mais n'est-il pas possible de trouver d'autres formes de succès prédictifs que ceux envisagés dans ce chapitre, qui permettraient de clarifier cette intuition réaliste, voire de la justifier ? Est-on condamné à la considérer comme un biais cognitif à rectifier, ou comme une pure évidence du cœur, similaire aux croyances religieuses et mystiques ? Dans le chapitre suivant, j'examine les rapports entre prédiction et expérimentation afin de montrer qu'un autre argument en faveur du réalisme scientifique est capable répondre à ces questions.

Chapitre 9

Expérimentation et prédiction

Jusqu'à présent nous avons envisagé les prédictions comme un *résultat*, comme l'aboutissement d'une série d'inférences. Dans ce chapitre, nous allons changer de perspective et considérer les énoncés prédictifs non plus comme le *terme* de l'application d'une théorie — la destination finale de la route qui va de la théorie à l'empirie — mais comme *le point de départ* d'une autre pratique scientifique : l'expérimentation. Ce changement de perspective est nécessaire pour définir une forme de succès scientifique qui n'a pas été conceptualisée jusqu'à présent mais qui permet de justifier la confiance que nous avons en l'existence de certaines entités : les succès prédictifs techniques.

En effet, changer de point de vue sur les prédictions permet de montrer les rapports qu'elles entretiennent avec les procédures d'interventions expérimentales, procédures qui sont au fondement d'un argument réaliste. Cet argument est souvent appelé, à la suite de Ian Hacking¹, « l'argument expérimental » en faveur du réalisme.

Dans la première section de ce chapitre, j'expose cet argument expérimental et la conception réaliste à laquelle il aboutit en concluant qu'il est impossible de ne pas croire en l'existence des entités que l'on manipule dans des expériences scientifiques. La première formulation de cet argument par I. Hacking refuse explicitement de considérer les succès expérimentaux comme des succès prédictifs, ce qui l'amène à rencontrer

¹Ian HACKING, *Representing and Intervening : Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983, p. 265.

d'importantes difficultés. La deuxième formulation de cet argument, par A. Chakravartty, laisse plus de place aux succès prédictifs mais rencontre aussi un certain nombre de problèmes.

L'objectif de ce chapitre est donc de montrer que l'on peut appliquer son argument en faveur du réalisme à certains succès prédictifs, car prédire est aussi bien une activité théorique qu'expérimentale. C'est pourquoi, dans la deuxième section, je montre que certains énoncés prédictifs peuvent être interprétés comme des schémas de protocoles pour produire techniquement des phénomènes expérimentaux. Cela m'amène, dans la troisième section de chapitre, à définir les prédictions auxquelles s'applique l'argument expérimental en faveur du réalisme et à évaluer la portée de cet argument.

9.1 L'argument expérimental en faveur du réalisme des entités

L'argument du miracle n'est pas le seul argument en faveur du réalisme scientifique : on peut aussi soutenir que la capacité des scientifiques à produire des phénomènes, à intervenir dessus et à manipuler des objets microscopiques (comme les quarks ou les électrons) est une preuve de la réalité de ces phénomènes et entités. La version la plus célèbre de cet argument est celle de I. Hacking dans son ouvrage de 1983, *Concevoir et expérimenter*². Dans cette section j'expose d'abord la formulation de l'argument expérimental par I. Hacking avant d'examiner une autre formulation de cet argument par A. Chakravartty.

9.1.1 L'argument de I. Hacking

L'objectif de *Concevoir et expérimenter* est de répondre à des questions concernant le réalisme scientifique telles que « Quel genre de choses existe dans le monde ? Que savons-nous de vrai à leur sujet ? »³. Le titre et le

²J'utilise ici la traduction française du titre, mais toutes les références qui suivent utilisent la pagination de l'édition originale en anglais.

³HACKING, *Representing and Intervening*, p. 1.

plan en deux parties de *Concevoir et expérimenter* annoncent l'ambition de son auteur de distinguer deux aspects de l'activité scientifique : celui qui consiste à *représenter* le monde et celui qui consiste à *y intervenir* par des expérimentations, avec pour volonté affichée de redonner ses lettres de noblesse philosophique à la pratique expérimentale. I. Hacking compare ainsi ses arguments aux « assauts de Marx contre l'idéalisme de son époque. Dans les deux cas, le but n'est pas de comprendre le monde, mais de le changer »⁴.

Cette dichotomie mène ainsi I. Hacking à opposer deux conceptions du réalisme scientifique reposant chacune sur des types d'arguments différents.

La première est le *réalisme théorique*, qui relève de la représentation et qui cherche à montrer la correspondance entre des postulats théoriques et la réalité — c'est la forme de réalisme scientifique que nous avons examinée dans le chapitre précédent. Pour I. Hacking, ce réalisme est voué à l'échec : aucun argument convaincant ne peut le soutenir. En effet, si l'on conçoit la science comme miroir de l'Univers, alors on est « enfermé dans un monde de représentations »⁵ : on ne pourra jamais montrer qu'une image scientifique du monde correspond à la réalité parce que cela supposerait d'avoir un accès non théorique à cette réalité, ce qui est impossible. C'est pourquoi I. Hacking écarte toute tentative « pour argumenter en faveur du réalisme au niveau des théories, des explications, des *succès prédictifs* ou de la convergence des théories »⁶.

La seconde conception du réalisme scientifique qu'identifie I. Hacking est le *réalisme des entités* : elle consiste à croire non pas en la vérité d'une description théorique du monde, mais en l'existence de certains objets grâce auxquels on peut intervenir sur d'autres phénomènes⁷. L'argument en faveur de cette position est souvent résumé par cette formule choc de I. Hacking : « si on peut les vaporiser, c'est qu'ils existent »⁸, en référence aux électrons projetés dans une expérience de physique des particules

⁴HACKING, *Representing and Intervening*, p. 274.

⁵HACKING, *Representing and Intervening*, p. 274.

⁶HACKING, *Representing and Intervening*, p. 273-274. Je souligne.

⁷HACKING, *Representing and Intervening*, p. 27.

⁸HACKING, *Representing and Intervening*, p. 22.

pour détecter des quarks libres.

Cette formule capture l'intuition derrière l'argument expérimental de I. Hacking (si l'on peut manipuler une entité, fût-elle microscopique comme un électron, il n'y a pas de raison de douter de son existence), mais il n'est pas inutile de citer la formulation plus développée qu'il en donne dans le dernier chapitre de son ouvrage :

L'argument — on pourrait l'appeler l'argument expérimental en faveur du réalisme scientifique — n'est pas que l'on infère la réalité des électrons à partir de nos succès. On ne fait pas l'instrument pour inférer ensuite la réalité des électrons, comme lorsque l'on teste une hypothèse pour y croire ensuite si elle a réussi le test. C'est mal comprendre l'ordre chronologique des choses. En réalité, on conçoit un dispositif en s'appuyant sur un petit nombre de vérités de base [*home truths*] concernant les électrons, afin de produire d'autres phénomènes que l'on souhaite examiner. [...]

*Nous sommes complètement convaincus de la réalité des électrons quand on entreprend régulièrement — et que l'on réussit suffisamment souvent — la construction de nouveaux dispositifs qui utilisent les propriétés causales connues des électrons pour interférer avec d'autres parties plus hypothétiques de la nature*⁹.

La structure de cet argument fait débat¹⁰, mais on peut faire remarquer qu'il se distingue des autres arguments en faveur du réalisme par *deux* particularités.

La première est que l'on est convaincu de la réalité d'une entité quand on l'utilise dans la construction d'un instrument et non quand on fait des expériences dessus ou qu'on la détecte :

Expérimenter sur une entité ne vous engage pas à croire qu'elle existe. Seule la *manipulation* d'une entité afin d'ex-

⁹HACKING, *Representing and Intervening*, p. 265.

¹⁰Voir Boaz MILLER, "What is Hacking Argument for Entity Realism?", *Synthese* 193.3 (2016), p. 991–1006, qui propose cinq manières différentes d'interpréter l'argument de I. Hacking.

périmenter sur quelque chose d'autre nécessite cet engagement¹¹.

Autrement dit, pour I. Hacking, ce n'est pas la *détection* d'une entité qui est décisive mais sa *manipulation* pour détecter ou mesurer d'autres phénomènes ou lois. C'est pourquoi l'exemple qu'il choisit pour illustrer l'argument expérimental n'est pas la détection de l'électron par Joseph Thomson (1856-1940) en 1897, mais l'utilisation d'un canon à électrons dans l'instrument PEGGY II, construit au début des années 1980 et destiné à détecter les courants neutres induits par la force électrofaible.

Cette distinction entre détection et manipulation est cruciale pour l'argument de I. Hacking. En effet, la détection consiste à rendre sensibles les effets dont un phénomène est la cause, alors que la manipulation consiste à agir sur un phénomène, c'est-à-dire à en être la cause. Autrement dit, l'ordre des causes et des effets entre l'expérimentateur et le phénomène qu'il étudie est inversé entre manipulation et détection. Or, on est intuitivement bien plus enclin à croire en la réalité d'un phénomène sur lequel on agit que sur la réalité d'un phénomène que l'on ne fait que détecter, parce que ce dernier pourrait être un artefact produit par notre instrument de détection ou une illusion. L'argument expérimental est donc bien plus intuitif s'il concerne les entités *manipulables* et non simplement *déTECTABLES*.

En outre, I. Hacking considère que la manipulation d'une entité, à la différence de sa détection, est une activité *infra théorique*. En effet, ce que l'on détecte diffère selon le cadre théorique utilisé pour interpréter les résultats d'une expérience de détection. Par exemple, la même mesure de baisse de température d'un corps pouvait être interprétée différemment par deux savants du XVIII^e siècle comme Antoine Lavoisier (1743-1794) et Pierre-Simon Laplace (1749-1827). Le premier y voyait la détection d'une fuite du fluide calorifique, le second l'interprétait comme la diminution de la vitesse moyenne des particules qui composent ce corps. Ils adhéraient en effet à des théories différentes (et concurrentes) de la chaleur. En revanche, la manipulation d'une entité ne demande d'adhérer qu'à quelques « vérités de base » concernant les pouvoirs causaux de cette

¹¹HACKING, *Representing and Intervening*, p. 263.

entité. C'est pourquoi Lavoisier et Laplace ont pu entreprendre ensemble, malgré leurs divergences théoriques, la construction d'un « calorimètre », un instrument destiné à comparer la capacité thermique (ou chaleur spécifique) de différents matériaux en mesurant le temps nécessaire pour faire fondre une quantité de glace donnée¹². Pour construire cet instrument, ils n'avaient en effet qu'à partager les croyances selon lesquelles la chaleur se diffuse de manière isotrope et continue et est responsable de la fonte de la glace (voir figure 9.1).

Ainsi, le caractère infra théorique de la manipulation est ce qui permet à la croyance aux entités manipulables de ne pas être sensible à l'incommensurabilité des langages théoriques et implique que la conception d'un même instrument puisse demander la coopération de théories différentes voire incompatibles :

Parfois, une équipe a besoin de sélectionner un membre avec une perspective théorique bien différente, uniquement pour avoir quelqu'un qui résout ces problèmes expérimentaux. Vous pouvez choisir quelqu'un avec une formation étrangère et dont la langue est quasiment incommensurable avec la vôtre, juste pour avoir la personne qu'il vous faut¹³.

La notion de manipulation se distinguant de celle de détection, l'argument expérimental de I. Hacking ne rencontre pas les mêmes problèmes de sous-détermination empirique que les autres arguments réalistes. Si l'on efface cette distinction, on risque de perdre la force de cet argument.

La deuxième particularité de l'argument expérimental de I. Hacking est qu'elle précise explicitement que ce n'est pas parce que l'on « prédit comment notre dispositif va se comporter »¹⁴ que l'on est convaincu de la réalité des entités manipulées par ce dispositif. Autrement dit, I. Hacking insiste sur le fait qu'une manipulation réussie n'est *pas* un succès prédictif. Il est ainsi impossible d'interpréter son argument comme une

¹²Pierre-Simon LAPLACE et Antoine LAVOISIER, *Mémoire sur la chaleur*, Paris, Gauthier-Villars, 1780, p. 20.

¹³HACKING, *Representing and Intervening*, p. 264.

¹⁴HACKING, *Representing and Intervening*, p. 274.

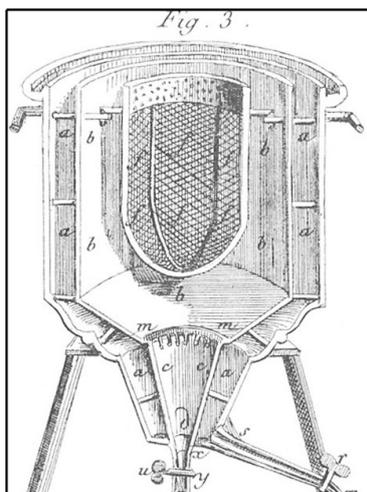


FIGURE 9.1 : Le calorimètre de Laplace et Lavoisier. La cuve *a* est remplie de glace pour isoler le dispositif de la température ambiante. La cavité *b* est elle aussi remplie de glace qui fond au contact de l'objet placé dans le panier *f*. La quantité de glace fondue qui mesure la capacité thermique de cet objet s'écoule par l'entonnoir *c* jusqu'en *d*. Source : Antoine LAVOISIER, *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Chez Cuchet, 1789.

variante de l'argument du miracle : on n'infère pas du succès des expérimentateurs la réalité des entités théoriques qu'ils manipulent parce que ce serait la meilleure explication de ce succès.

En effet, pour I. Hacking, la construction d'un dispositif expérimental ne doit pas grand chose à une théorie donnée. Comme on l'a vu, seules quelques croyances partagées sur les pouvoirs causaux des entités manipulées sont nécessaires et le reste du travail des expérimentateurs n'est pas théorique. Une grande partie de ce travail consiste par exemple à faire disparaître les sources de « bruit » qui gênent la détection ou la mesure. Or, d'après I. Hacking, la plupart des mesures anti-bruit ne reposent sur aucune connaissance théorique, tout simplement parce que ces sources de bruit sont souvent inconnues. Est-ce que la poussière risque de gêner la détection d'un phénomène ? Nul ne le sait, mais dans le doute les expérimentateurs se munissent d'un spray anti-poussière¹⁵.

C'est pourquoi I. Hacking insiste sur le fait que l'on est convaincu de

¹⁵HACKING, *Representing and Intervening*, p. 270.

l'existence d'une entité *avant* de construire un dispositif qui la manipule et non *après* le succès de ce dispositif : sinon on ne pourrait justifier tout ce travail expérimental. La reconstruction de l'argument expérimental de I. Hacking qui semble la plus satisfaisante est donc celle proposée par Margaret Morrison, qui le présente comme un argument transcendantal : la croyance en la réalité d'une entité est la *condition de possibilité* de sa manipulation expérimentale parce qu'« il est tout simplement insensé de douter des affirmations ontologiques et épistémologiques qui donnent son sens à cette pratique »¹⁶.

Naturellement, I. Hacking admet que si aucune tentative pour manipuler ces entités ne réussit, on perd foi en leur réalité : « les entités théoriques qui, après une longue durée de vie, n'ont pas fini par être manipulées, se sont généralement révélées être de grandioses erreurs¹⁷ ». Cette phrase, qui clôt *Concevoir et expérimenter*, montre que l'argument de I. Hacking a le mérite de prendre en considération les leçons de l'histoire des sciences et résiste plus solidement à l'induction pessimiste que l'argument du miracle. En effet, les révolutions scientifiques font varier notre représentation scientifique du monde elles affectent moins les pratiques expérimentales. Donc, si notre croyance en la réalité de certaines entités ne vient pas de cette représentation mais de notre pratique expérimentale, les révolutions scientifiques n'affectent que peu cette croyance.

Ainsi, l'argument expérimental de I. Hacking semble tirer toute sa force d'une séparation presque étanche entre la partie expérimentale et la partie théorique de l'activité scientifique. Dans ces conditions, comment pourrait-on l'appliquer aux succès prédictifs ? Mais avant montrer que les prédictions ont une part importante dans les pratiques expérimentales, il faut remarquer que leur exclusion a des conséquences sur la solidité et la généralité de l'argument de I. Hacking.

¹⁶Margaret MORRISON, "Theory, intervention and realism", *Synthese* 82.1 (1990), p. 1-22, p. 17.

¹⁷HACKING, *Representing and Intervening*, p. 275.

9.1.2 Les problèmes de l'argument expérimental

La première limite de l'argumentation de I. Hacking est que la notion de manipulation est *anthropocentrée*. En effet, on parle de manipulation quand un agent humain entre en contact avec un système physique pour en modifier les conditions.

Cet anthropocentrisme a au moins une conséquence embarrassante : il exclut du champ de l'argument de I. Hacking tous les objets trop lointains, trop massifs ou trop subtils pour que nous, humains, puissions agir dessus, comme par exemple les trous noirs, le big bang, la tectonique des plaques ou les désirs inconscients. I. Hacking assume pleinement cette conséquence dans un article de 1989 intitulé « Extragalactic Reality » où il se présente comme « un anti-réaliste en ce qui concerne l'astrophysique »¹⁸ parce que l'on ne peut pas manipuler les objets astrophysiques inobservables, comme les lentilles gravitationnelles.

Pour I. Hacking, l'astrophysique (il semble entendre par là toute science qui s'occupe d'objets situés au-delà de notre système solaire, puisque c'est la limite qu'ont atteinte des machines humaines) a « toujours la même méthode » que dans l'antiquité : observer et construire des modèles pour rendre compte des observations ; tandis que « les méthodes des sciences naturelles ont connu de profondes transformations »¹⁹ en devenant, au XVII^e siècle, des sciences expérimentales qui créent de nouveaux phénomènes. Ainsi I. Hacking oppose des *sciences du laboratoire* à des *sciences de l'observatoire*, sciences qui ne connaîtraient que l'aspect théorique de l'activité scientifique et qui seraient destinées à rester enfermées dans un monde de représentations. Cette distinction est loin d'être évidente et on la remet en question dans la section qui suit.

La deuxième limite de l'argument de I. Hacking est qu'il suppose, comme l'a montré M. Morrison²⁰, que l'on peut différencier deux types de connaissance à propos d'une entité : la représentation qu'en donne une théorie et les « vérités de base » concernant les pouvoirs causaux de cette entité, c'est-à-dire les connaissances sur cette entité mobilisées dans la

¹⁸Ian HACKING, "Extragalactic Reality : The Case of Gravitational Lensing", *Philosophy of Science* 56.4 (1989), p. 555–581, p. 576.

¹⁹HACKING, "Extragalactic Reality : The Case of Gravitational Lensing", p. 577.

²⁰MORRISON, "Theory, intervention and realism", p. 16.

construction du dispositif les manipulant. On a vu que deux scientifiques adhérant à des théories différentes sur le même objet, comme Lavoisier et Laplace, pouvaient collaborer à la création d'un même instrument s'ils partagent un ensemble restreint de croyance. Mais selon le dispositif construit, le rôle joué par une entité ne sera pas le même et les « vérités de base » sur les pouvoirs causaux de cette entité différeront.

Par exemple, deux scientifiques qui veulent construire une chambre à bulle²¹ adhérant à des modèles théoriques différents de l'électron doivent s'accorder uniquement sur le fait que l'électron est une entité discrète chargée négativement. Mais les deux mêmes scientifiques, si elles décident ensuite de construire un canon à électrons pour pouvoir mesurer la taille des noyaux des atomes qui composent une feuille de métal, devront se mettre d'accord sur d'autres « vérités de base » concernant les électrons²². En effet, cette expérience consiste à mesurer la probabilité que les électrons projetés soient déviés par les noyaux de ces atomes : il est donc nécessaire que les deux scientifiques s'accordent sur la section efficace des électrons, sur leur trajectoire et leur comportement après un choc. Comment ces scientifiques ne pourraient-elles pas converger peu à peu vers une description théorique commune de l'électron en multipliant leurs expériences ?

En outre, lorsque I. Hacking décrit le travail des expérimentateurs pour éliminer les sources de bruit comme un travail purement non-théorique, il exagère et force le trait. L'interféromètre, inventé par Albert Michelson (1852-1931) et utilisé dans plusieurs séries d'expériences en 1881 et 1887, par exemple, était plongé dans un bain de mercure. L'objectif était de stabiliser le dispositif pour qu'il ne soit pas perturbé par les vibrations du sol dues au passage de camions dans la rue devant le laboratoire (voir figure 9.2). Certes, il s'agit d'un procédé ingénieux qui semble plus relever du bricolage que de la conception théorique. Et pourtant, Michelson n'a

²¹Une chambre à bulle est une cavité saturée de vapeur d'eau, qui se condense en gouttelettes lorsqu'elle est perturbée. On peut ainsi observer la trajectoire des particules qui la traversent sous l'effet d'un champ électromagnétique.

²²Cette expérience est celle que réalisa Ernest Rutherford (1871-1937) en 1911 sur une feuille d'or avec des particules alpha ($4He^{2+}$) et qui le mena représenté l'atome comme un noyau séparé par de grands volumes de vide des électrons qui orbitent autour de lui.

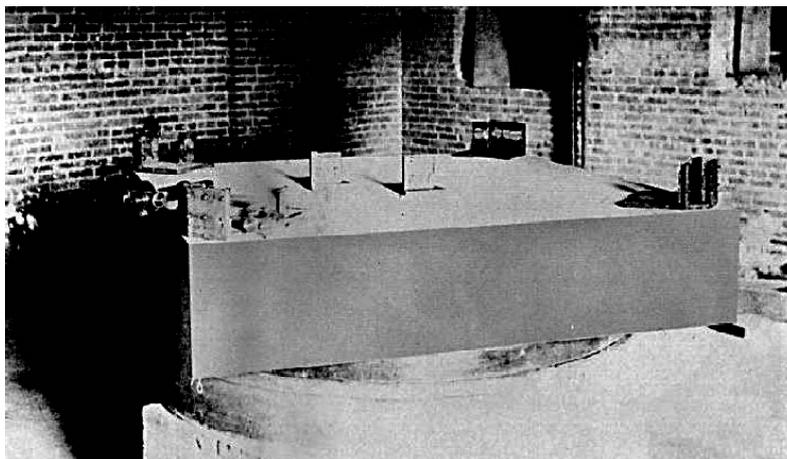


FIGURE 9.2 : L'interféromètre de Michelson utilisé pour les expériences de 1887. Le socle en pierre qui lui sert de support repose elle-même sur un bain de mercure pour que les vibrations du sol ne lui soient pas transmises. Source : Wikicommons.

pu juger ce procédé nécessaire que parce qu'il savait que son appareil mesurait des interférences de l'ordre du nanomètre et qu'il serait sensible à des vibrations provoquées par un camion plusieurs étages plus bas. L'élimination de cette source de « bruit » a donc pour fondement un certain nombre de connaissances théoriques sur la lumière, la manière dont elle se propage et dont elle interfère.

Il est donc difficile de détacher complètement la réalisation de dispositifs expérimentaux de toute description théorique. Comme le fait remarquer M. Morisson : « Ce n'est pas seulement "faire" qui entraîne la conviction, mais savoir *que* l'on fait et *ce que* l'on fait »²³. Or, pour savoir ce que l'on fait lorsque l'on expérimente, il faut disposer d'un minimum théorique et I. Hacking n'indique pas d'où provient ni comment les expérimentateurs prennent connaissance de ce minimum théorique. L'argument expérimental ne nous engage ontologiquement envers une entité que parce qu'elle a des pouvoirs causaux que nous utilisons pour la manipuler. Pour que cet argument fonctionne, il faut donc répondre à la question de savoir quelles sont précisément les connaissances causales sur une entité nécessaires pour concevoir un dispositif expérimental.

²³MORRISON, "Theory, intervention and realism", p. 8.

Dans la section suivante, je montre que certaines prédictions jouent un rôle crucial dans les pratiques expérimentales. Une fois ce rôle reconnu, on peut appliquer l'argument expérimental de I. Hacking à certains succès prédictifs et résoudre les difficultés que l'on vient d'exposer.

9.1.3 L'argument d'A. Chakravartty et ses limites

A. Chakravartty, dans *A Metaphysics for scientific realism* a proposé une nouvelle formulation de l'argument expérimental en faveur du réalisme des entités qui résout une partie des problèmes de l'argument original de I. Hacking mais qui en pose d'autres.

L'objectif d'A. Chakravartty n'est pas de fournir une défense du réalisme scientifique contre les attaques des anti-réalistes. Comme il l'explique dans un récent article²⁴, il conçoit le réalisme et l'antiréalisme comme des attitudes philosophiques (*stances*) que l'on choisit en fonction de valeurs subjectives. Tout ce que l'on peut demander à de telles attitudes est d'être rationnelles, c'est-à-dire ne pas mener à de contradictions. *A Metaphysics for scientific realism* est une tentative pour édifier une telle position réaliste cohérente.

Cependant, la forme que prend cette position dépend en partie de la manière dont on peut avoir accès aux informations vraies que contient chaque théorie scientifique. A. Chakravartty est donc amené à élaborer un argument en faveur du réalisme pour discriminer entre les aspects des théories dignes de foi — sur lesquels on peut fonder une métaphysique scientifique — et ceux qui ne le sont pas.

A. Chakravartty s'inspire explicitement de l'argument de I. Hacking²⁵ pour faire cette distinction mais le modifie suffisamment pour que l'on puisse parler d'une nouvelle version de l'argument expérimental en faveur du réalisme. Cette distinction repose sur la différence entre des entités *déTECTABLES* avec lesquelles nous sommes en contact causal *via* nos sens ou nos instruments et des entités *AUXILIAIRES* qui sont postulées par des

²⁴Anjan CHAKRAVARTTY, "Suspension of belief and epistemologies of science", *International Journal for the Study of Skepticism* 5.2 (2015), p. 168–192.

²⁵Voir CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 30.

théories sans que nous puissions établir de contact causal avec elles²⁶. Ainsi, pour A. Chakravartty, nous croyons aux entités et aux structures postulées par des théories *dans la mesure où nous sommes en contact causal avec elles*. La croyance en la réalité d'un postulat théorique n'est pas affaire de tout ou rien mais de degrés : « on trouve en science un spectre graduel d'engagement que les réalistes devraient imiter »²⁷.

À l'une des extrémités de ce spectre on trouverait ainsi les entités que l'on est capable de *manipuler*, les électrons ou les gènes par exemple. À l'autre extrémité, on trouverait les entités que l'on n'est capable de détecter qu'indirectement, la matière noire par exemple. Entre les deux, on trouverait toute une gamme d'entités détectées directement mais que l'on ne sait pas (pour l'instant) manipuler, comme les quarks ou les nuages de poussière interstellaire. La croyance en la réalité de ces entités intermédiaires augmente proportionnellement au nombre de moyens indépendants que l'on a de les détecter.

Cette conception graduelle du réalisme, qu'A. Chakravartty nomme *semiréalisme*, a deux avantages sur l'argument de I. Hacking. En premier lieu, elle a le mérite de montrer que l'opposition entre réalisme structural et réalisme des entités est plus un problème de mots qu'un problème réel. En effet, si l'on croit en l'existence de certaines entités parce qu'elles ont des pouvoirs causaux qui nous permettent de les détecter ou de les manipuler, alors on croit aussi aux relations de dépendances causales qui lient ces entités à d'autres : « les entités et les structures sont métaphysiquement séparables, mais nous ne pouvons y accéder que comme à un ensemble épistémiquement entrelacé »²⁸.

Le deuxième intérêt de l'argument d'A. Chakravartty est qu'il ne dresse aucune séparation étanche entre pratique expérimentale et pratique théorique comme le fait I. Hacking. En admettant qu'il existe un spectre continu entre les entités détectables et les entités manipulables, A. Chakravartty admet qu'il existe une limite floue entre des entités *dé-*

²⁶CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 47.

²⁷CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 33.

²⁸Anjan CHAKRAVARTTY, "Semirealism", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 29.3 (1998), p. 391–408, p. 407.

tectables auxquelles on croit et des entités *auxiliaires* qui ne sont garanties d'existence²⁹. Il n'y a donc pas de privilège donné aux entités que l'on peut manipuler directement, ce qui évacue les soucis d'anthropocentrisme de l'argument de I. Hacking et rend possible l'identification de succès à la fois expérimentaux et prédictifs.

Cependant, ces avantages de l'argument expérimental d'A. Chakravartty font aussi ses limites. Il n'est pas sûr que cet argument résiste aussi bien à l'induction pessimiste que celui de I. Hacking. A. Chakravartty affirme par exemple que :

S'il existe certains principes épistémiques qui permettent l'identification d'aspects théoriques qui sont susceptibles d'être retenus dans les théories futures, alors il importe peu que les théories passées soient généralement considérées comme fausses. [...]

Or, les réalistes ont bien un critère prometteur pour identifier les parties d'une théorie qui sont susceptibles d'être retenues, à savoir leur connaissance causale détaillée³⁰.

Mais est-il réellement nécessaire et suffisant d'avoir une connaissance causale détaillée d'une entité pour qu'elle se maintienne d'une théorie à l'autre ? Pour rendre justice à la conception d'A. Chakravartty, il faut se souvenir que sa conception du réalisme est graduelle : plus on a de rapports causaux avec une entité, plus on y croit et donc plus elle est à de chances d'être retenue dans des théories postérieures. Une entité que l'on détecte directement par diverses méthodes serait donc plus susceptible d'être retenue qu'une entité que l'on détecte par une seule méthode.

Mais dans certains cas de révolutions scientifiques, c'est l'inverse qui se produit. Prenons l'exemple du *phlogistique*, cette substance qui, dans la chimie de Joseph Priestley (1733-1804), rendait compte de la combustion, de la respiration et de la calcination. Du point de vue d'un contemporain de Priestley, les pouvoirs causaux du phlogistique semblaient connus de

²⁹CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 47.

³⁰Anjan CHAKRAVARTTY, "What you don't know can't hurt you : realism and the unconceived", *Philosophical Studies* 137.1 (2008), p. 149–158, p. 155.

manière détaillée. Même si cette substance était censée être incolore et invisible, elle pouvait être mieux identifiée et manipulée que le *fluide calorique*, une autre substance incolore et invisible qui rendait compte de la chaleur spécifique des corps.

Pourtant, quand la chimie de Lavoisier remplaça celle de Priestley, le phlogistique disparut et le fluide calorique fut retenu. L'histoire des sciences montre que l'entité considérée comme la plus détectable n'est pas toujours la plus susceptible d'être retenue. Ce cas historique serait inoffensif si l'on considérait que le phlogistique de Priestley fut remplacé par l'oxygène de Lavoisier et que ces deux noms renvoient à la même substance, mais c'est précisément ce qu'A. Chakravartty³¹ refuse (à raison me semble-t-il, parce cela rendrait ce progrès scientifique trivial).

On peut en revanche accorder à A. Chakravartty que les *méthodes de détection* du phlogistique ont bien survécu à la révolution chimique de Lavoisier, puisque l'une des techniques que celui-ci utilise pour isoler l'oxygène est celle que Priestley avait mis au point pour isoler le phlogistique. Si la description théorique de ce qui est isolé par cette méthode a changé, cette technique expérimentale et le fait que l'on isole *quelque chose* par cette méthode a été retenu.

Ainsi, l'argument d'A. Chakravartty résout bien certains des problèmes de l'argument de I. Hacking mais sa réponse à l'induction pessimiste oscille entre deux positions :

- Soit A. Chakravartty considère que les entités détectables se maintiennent lors des progrès scientifiques parce qu'elles existent réellement, mais ce faisant il prête le flanc à l'objection qu'essaye d'éviter I. Hacking en insistant sur la manipulabilité plutôt que la détection : on ne peut rien savoir de ce que l'on détecte sans une interprétation théorique qui est susceptible d'être remplacée par une autre représentation scientifique du monde lors d'une prochaine révolution.
- Soit A. Chakravartty admet que seules les *techniques* de détection sont retenues lors des révolutions scientifiques et donc que l'interprétation théorique de ces détections en termes d'entités et de

³¹CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 55.

structures causales ne doit pas dépasser une interprétation théorique minimale ontologiquement très modeste.

C'est cette dernière solution qui semble avoir les faveurs d'A. Chakravartty³² et que l'on examine dans la dernière section du chapitre. Dans ce qui suit je propose une nouvelle version de l'argument expérimental en faveur du réalisme qui ne s'appuie ni sur la notion de manipulation ni sur celle de connaissance causale, mais sur les rapports qui existent entre prédiction et expérimentation.

9.2 Le rôle des prédictions dans les pratiques expérimentales

L'objectif de cette section est de remettre au premier plan la conception de la méthode hypothétique et des prédictions comme un moyen d'« anticiper l'expérience »³³. Il ne faut pas entendre par là que les prédictions seraient premières logiquement ou chronologiquement à toute expérience scientifique, mais que certaines prédictions permettent de *préparer* la réalisation d'une expérience — comme on prépare une manipulation expérimentale en sortant, en mettant en ordre et en vérifiant les instruments dont on va avoir besoin pour la réaliser. En effet, comme on va le voir en analysant la forme logique des énoncés prédictifs, ceux-ci peuvent être interprétés comme des protocoles d'intervention expérimentale.

9.2.1 Un exemple d'énoncé prédictif

Commençons par l'exemple de l'énoncé prédictif auquel aboutit la prédiction du point lumineux de Fresnel (voir chapitre 8, section 8.2.3). Nous avons vu que dans le cadre de la théorie de Fresnel, il existe deux dérivations de cette même prédiction, c'est-à-dire de l'énoncé :

³²Voir CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 53.

³³On trouve cette formule notamment chez Comte et Mill : MILL, *Système de logique*, III, ch.14, p.14. Voir aussi chapitre 6, section 6.1.4.

Si l'on place un obstacle parfaitement circulaire sur l'axe optique de la lumière émise par une source lumineuse ponctuelle et que les rayons à l'infini ne sont pas diffractés, *alors* on observe un point lumineux au centre de l'ombre portée par cet obstacle sur un écran.

Pour être précis, il faut rajouter que les dimensions de l'obstacle diffractant D , la longueur d'onde de la lumière λ et la distance entre l'obstacle et l'écran L doivent respecter la relation suivante :

$$\frac{D^2}{L\lambda} > \frac{1}{2}$$

Cette condition assure que l'on a affaire à une diffraction en champ proche (ou diffraction de Fresnel) et non à une diffraction en champ lointain (ou diffraction de Fraunhofer) pour laquelle la théorie optique de Fresnel de s'applique pas. Si l'on note (C1) cette condition, (C2) la condition selon laquelle l'écran est parfaitement circulaire, (C3) la condition selon laquelle la source lumineuse est ponctuelle et (C4) la condition qu'il n'y ait pas de diffraction à l'infini, alors l'énoncé prédictif du point lumineux peut s'écrire ainsi :

Si (C1), (C2), (C3) et (C4) sont réunies, *alors* on observe un point lumineux au centre de l'ombre portée par cet obstacle sur un écran.

Cet énoncé prédictif est un énoncé conditionnel. Comme le remarque Popper dans *Misère de l'historicisme*, certaines prédictions sont « constructives, suggérant les étapes que l'on peut réaliser si l'on veut atteindre certains résultats »³⁴. En effet, l'antécédent de cet énoncé conditionnel décrit les conditions d'un système physique dans lequel apparaît un phénomène donné (ici, le point lumineux) énoncé par le conséquent. Cet antécédent représente donc le *dispositif expérimental* que doit réaliser physiquement l'expérimentateur, c'est-à-dire à la fois les instruments dont il a besoin et la manière de les utiliser (le protocole expérimental). À la suite de Popper, nous appellerons de tels énoncés prédictifs des *prédictions techniques*.

³⁴Karl POPPER, *Misère de l'historicisme*, Paris, Plon, 1956, ch.15.

Le problème qui apparaît immédiatement est que les conditions (C2), (C3) et (C4) sont des *idéalisations* (au sens défini dans le chapitre précédent, section 8.2.3), c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être interprétées littéralement : il est impossible de trouver un objet parfaitement circulaire, une source lumineuse parfaitement ponctuelle ou un instrument qui mesure la diffraction à l'infini.

C'est donc l'expérimentatrice qui doit paraphraser ces conditions en termes de négligeabilité, comme le suggère U. Mäki³⁵ : elle ne peut pas trouver une source lumineuse réellement ponctuelle ou un obstacle parfaitement circulaire, mais elle interprète ces conditions comme la nécessité de trouver une source et un obstacle qui ne s'écarte que de manière négligeable de ces formes géométriques. Cela signifie que cet écart et ses effets doivent rester en-dessous du seuil de sensibilité de ses instruments. Elle ne peut pas non plus réaliser *physiquement* un dispositif expérimental infiniment large, mais peut par exemple choisir une salle vide suffisamment large pour qu'aucune source de diffraction secondaire ne puisse perturber la diffraction et les interférences dues à l'obstacle circulaire.

Par conséquent, s'il est faux de décrire les idéalizations comme *logiquement équivalentes* à leur paraphrase en termes de négligeabilité (voir section 8.2.3), il est tout à fait correct de remarquer que les expérimentatrices interprètent les hypothèses auxiliaires idéalisées par de telles paraphrases : pour une expérimentatrice, les conditions (C2), (C3) et (C4) ne sont pas à interpréter littéralement mais indiquent des sources de perturbation qu'il s'agit de bloquer ou d'amoindrir. On peut estimer que les conditions aux limites sont réalisées expérimentalement lorsque l'on a les moyens de réaliser cette isolation d'un système physique de manière à ce que les perturbations extérieures soient d'un ordre de grandeur suffisamment petit par rapport à celui des grandeurs impliquées dans la production du phénomène.

Voilà pourquoi les dispositifs expérimentaux font intervenir des instruments et de protocoles destinés à *isoler* le système étudié du reste de la nature : c'est ainsi que les conditions idéalisées des prédictions scientifiques peuvent être réalisées. C'est ce que Gaston Bachelard (1884-1962)

³⁵MÄKI, "The Truth of False Idealizations in Modeling".

appelle le *principe de négligeabilité* dans le chapitre de *La Formation de l'esprit scientifique* consacré aux obstacles de la connaissance quantitative :

La volonté de négliger est vraiment active dans la technique opératoire contemporaine. Un appareil peut en effet être décrit, si l'on peut s'exprimer ainsi, aussi bien au négatif qu'au positif. On le définit par les perturbations dont il se garde, par la technique de son isolement, par l'assurance qu'il donne qu'on peut négliger des influences bien définies, bref par le fait qu'il enferme un *système clos*. C'est un complexe d'écrans, de gaines, d'immobilisateurs, qui tient le phénomène en clôture. Tout ce *négativisme monté* qu'est un appareil de physique contemporain contredit aux molles affirmations d'une possibilité d'interaction phénoménologique indéterminée³⁶.

C'est dans la construction de ce négativisme monté que se jouent l'ingéniosité et l'inventivité de l'expérimentatrice. En effet, chacune des conditions de l'antécédent d'une prédiction technique peut être réalisée de différentes manières et c'est à elle de trouver un dispositif matériel qui les satisfait toutes de manière à pouvoir négliger toute perturbation extérieure. Ainsi, lorsqu'Arago chercha à réaliser une expérience pour tester la prédiction du point lumineux, il utilisa probablement la lumière du soleil traversant une lentille convergente afin de se rapprocher le plus possible d'une source ponctuelle, mais Fresnel indique aussi la possibilité d'utiliser la lumière d'étoiles fixes amplifiées par une lunette astronomique³⁷. Lorsque l'on répète cette expérience aujourd'hui, on utilise en général un laser.

Pour s'assurer que l'obstacle est parfaitement circulaire, Fresnel rapporte qu'Arago utilisa un écran de deux millimètres de diamètre « collé par son centre, avec un peu de cire molle, sur une plaque de verre » et que cet écran était « tourné avec le plus grand soin en forme de cône

³⁶Gaston BACHELARD, *La Formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin, 1938, p. 265.

³⁷FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 369.

tronqué, de manière que ses bords soient taillés en biseau »³⁸ pour éviter que son épaisseur ne provoque une diffraction perturbatrice. Mais on aurait aussi pu utiliser une sphère suspendu en son centre par deux fils très fins, voire en lévitation magnétique. Les expériences scientifiques qui impressionnent par leur ingéniosité et leur inventivité sont précisément celles qui réussissent d'une manière inattendue à réaliser des conditions imposées par une prédiction qui semblaient irréalisables en pratique³⁹.

En résumé, l'exemple de l'énoncé prédictif du point lumineux de Fresnel montre qu'il existe des énoncés prédictifs qui sont des énoncés conditionnels dont l'antécédent décrit un dispositif schématique, qui peut être réalisé de différentes manières et dont le conséquent décrit le phénomène prédit. Ce type d'énoncé prédictif peut donc être considéré comme le protocole d'une expérience hypothétique décrivant ce qu'il faudrait *en droit* réaliser pour observer un phénomène prédit, laissant à l'expérimentateur la tâche de le réaliser *dans les faits*.

Dans la section suivante, je reformule cette conclusion en termes de variables et d'intervention pour montrer que l'on peut considérer que ces prédictions techniques correspondent à des protocoles d'intervention expérimentale.

9.2.2 Les énoncés prédictifs comme protocoles d'intervention expérimentale

Pour généraliser l'exemple de la prédiction du point lumineux de Fresnel, on peut employer la notion de *variable* qui est fréquemment utilisée dans les études expérimentales, que ce soit dans les sciences de la nature, les sciences médicales ou les sciences sociales. Les scientifiques distinguent deux types de variables : les variables *indépendantes* et les variables *dépendantes*. Une variable indépendante est un paramètre de l'expérience

³⁸FRESNEL, *Œuvres complètes d'Augustin Fresnel*, p. 369.

³⁹On peut citer par exemple les expériences de Serge Haroche réalisées pendant les années 1980-1990 au laboratoire Kastler-Brossel de l'École Normale Supérieure qui ont réussi, en utilisant des cavités à micro-onde, à maintenir un atome dans un état de Rydberg circulaire suffisamment isolé de son environnement pour que l'on puisse le maintenir dans une superposition d'états quantiques, réalisant ainsi les conditions de ce qui ne pouvait être qu'une expérience de pensée pour Schrödinger.

que l'expérimentatrice peut faire varier sans modifier auparavant d'autres variables (indépendamment des autres variables), tandis qu'une variable dépendante est un paramètre qu'elle ne peut pas faire varier sans modifier d'autres variables. Par exemple, dans le cas de la prédiction du point lumineux de Fresnel, les variables indépendantes sont les dimensions et la forme de l'obstacle, la distance entre les différents éléments du dispositif, la couleur, l'intensité, la forme et l'angle d'incidence de la source lumineuse ; les variables dépendantes sont l'amplitude des rayons lumineux, leur longueur d'onde, leur vitesse et leur trajectoire après la diffraction.

Reformuler ainsi la pratique expérimentale en termes de variables permet de substituer à la notion de manipulation expérimentale de I. Hacking celle d'*intervention sur une ou plusieurs variable(s)* : une manipulation expérimentale consiste à intervenir sur une ou plusieurs variables indépendantes pour produire une variation corrélée d'autres variables. Cette notion d'intervention a été développée par J. Woodward dans le cadre de sa théorie de la causalité qui interprète l'affirmation d'une relation causale entre deux variables comme une *intervention possible* sur ces variables :

(IN) Une intervention I sur la variable X par rapport à Y (dans le but de savoir si X cause Y) est un processus causal exogène qui détermine complètement la valeur de X d'une telle manière que si la valeur de Y change, il ne change qu'en vertu de la relation de Y à X ⁴⁰.

Laissons pour l'instant de côté la question de savoir si cette notion d'intervention permet de définir adéquatement les relations de dépendance causale. On peut tout d'abord remarquer que les prédictions techniques consistent en un protocole pour intervenir sur des variables indépendantes afin de modifier des variables dépendantes. Dans l'exemple de la prédiction du point lumineux de Fresnel, par exemple, les conditions (C1) à (C4) n'auraient aucun sens et ne pourraient jamais inciter

⁴⁰Jim WOODWARD, "Experimentation, causal inference and instrumental realism", *The Philosophy of Scientific Experimentation*, sous la dir. d'Hans RADDER, University of Pittsburgh Press, 2003, p. 97–118, p. 91.

aucune expérimentatrice à construire un dispositif expérimental si les variables indépendantes qui apparaissent dans ces conditions n'étaient pas corrélées à l'amplitude et à la diffraction des rayons lumineux, variables elles-mêmes corrélées à l'apparition du point lumineux. Autrement dit, si l'on ne croyait pas en la corrélation entre ces variables indépendantes et certaines variables dépendantes de la lumière, la prédiction technique du point lumineux aurait autant de sens qu'un énoncé conditionnel superstitieux du type : « si l'on jette du sel par dessus son épaule droite, alors on aura de la chance ».

Ainsi, les conditions (C1) à (C4) indiquent comment ajuster les variables indépendantes du dispositif pour faire varier la diffraction des rayons lumineux de manière à obtenir une interférence constructive de leur amplitude au centre de l'ombre de l'obstacle circulaire ⁴¹. Lorsque toutes les variables qui apparaissent dans l'antécédent d'un énoncé prédictif sont des variables indépendantes, on a affaire à une *prédiction technique*, puisque toutes les étapes de la mise en place d'un dispositif expérimental sont alors décrites dans l'antécédent de l'énoncé prédictif.

On peut désormais répondre à l'objection que l'on avait soulevée dans la section précédente contre l'argument expérimental de I. Hacking : quelles sont les « vérités de base » nécessaires pour la manipuler et faire une expérience sur une autre entité ? Appelons m l'entité manipulée et e l'entité sur laquelle on expérimente. Il est évident qu'il faut connaître un certain nombre de corrélations entre e et m pour construire un dispositif destiné à manipuler m pour interagir avec e . Plus précisément, si l'on veut faire varier la variable Y de e , il faut connaître au moins une relation de dépendance entre Y et une variable X de m . Mais il faut, en outre, connaître aussi une relation entre la variable X de m et (au moins) une variable indépendante I , sinon il serait impossible de faire varier X (voir figure 9.3). Autrement dit, ce que I. Hacking décrit comme une manipulation correspond à ce que J. Woodward appelle l'intervention I

⁴¹Il n'y a que dans la condition (C1) qu'apparaît une variable dépendante : la longueur d'onde λ de la lumière. Mais comme (C1) énonce le rapport de λ à d'autres grandeurs du système (L la longueur entre l'objet et l'écran, D la dimension de la source de diffraction) qui, elles, sont des variables indépendantes, on peut considérer que cette condition porte elle aussi sur des variables indépendantes.



FIGURE 9.3 : Un cas de manipulation expérimentale représenté avec le symbolisme de J. Woodward. On manipule l'entité m pour agir sur l'entité e en intervenant sur la variable indépendante I qui est corrélée avec la variable X de m , laquelle est corrélée à la variable Y de e .

sur X pour faire varier Y . Les « vérités de base » impliquées dans cette intervention sont donc celles qui concernent les relations causales entre les variables de l'entité manipulée et les variables indépendantes d'une part et les variables de l'entité sur laquelle on expérimente de l'autre.

Or, il serait absurde d'utiliser l'entité m pour expérimenter sur e s'il était impossible de prédire comment la modification de certaines variables indépendantes fait varier les variables de m qui sont en relations avec les variables de e . Il est donc impossible, contrairement à ce que souhaiterait I. Hacking de circonscrire un ensemble de vérités de base sur les pouvoirs causaux d'une entité et de prétendre en même temps que l'on peut le faire sans prédiction : *circonscrire ces vérités de base, c'est faire une prédiction et faire une prédiction, c'est circonscrire de telles vérités de base*. Comme le fait remarquer J. Woodward, à partir du moment où l'on considère qu'une intervention permet d'identifier des relations causales, alors toute affirmation concernant une relation de causalité peut être interprétée comme une « prédiction du résultat d'une expérience hypothétique »⁴².

Les vérités de base concernant les pouvoirs causaux qui sont nécessaires à une intervention expérimentale peuvent donc être interprétées comme des prédictions techniques et, inversement, les prédictions techniques peuvent être interprétées comme des énoncés prédictifs qui regroupent les informations causales nécessaires pour pouvoir servir de

⁴²WOODWARD, "Experimentation, causal inference and instrumental realism", p. 105.

protocole d'intervention expérimentale.

Il ne s'ensuit pas pour autant que toute expérimentation doit pouvoir être prédite pour pouvoir être une authentique expérience scientifique : on ne parle ici que d'un certain type de prédictions (les prédictions techniques) et d'un certain type de pratiques expérimentales (les interventions, au sens de J. Woodward) parce qu'il existe des prédictions qui ne sont pas des protocoles d'intervention expérimentale. Par exemple, la prédiction de la théorie des cordes selon laquelle il existe 10^{500} versions des lois de la physique n'est bien évidemment pas une prédiction technique dans laquelle on trouve énoncées la liste des modifications à apporter à des variables indépendantes pour produire un phénomène. Réciproquement, il existe aussi des pratiques expérimentales qui ne sont pas des interventions et qui ne sont pas *prédictibles*, c'est-à-dire que leurs protocoles expérimentaux ne peuvent pas être interprétés comme des énoncés prédictifs. André Lwoff (1902-1994) en donne un exemple frappant lorsqu'il fait le récit de ses recherches sur la lysogénie (l'état d'une bactérie infectée par un virus bactériophage) :

Ainsi, les résultats négatifs s'accumulaient, lorsqu'après des mois et des mois de désespoirs, il fut décidé d'irradier les bactéries avec un rayonnement ultra-violet. Ce n'était pas rationnel du tout, parce que ce rayonnement tue les bactéries et les bactériophages et d'un point de vue strictement logique cette idée me paraît toujours illogique⁴³.

Il arrive que la recherche expérimentale soit totalement exploratoire et aille même à l'encontre de ce que prédisent les plus élémentaires « vérités de base » : cela ne les empêche pas de réussir, puisque c'est en plaçant les bactéries lysogènes sous des lampes UV que Lwoff et son équipe firent leurs premières découvertes.

Je n'affirme donc pas croire que toute recherche expérimentale soit nécessairement interprétable comme une prédiction technique. Mais il ne faut pas non plus croire que le lien que nous venons de constater entre

⁴³André LWOFF, "The Prophage and I", *Phage and the Origins of Molecular Biology*, sous la dir. de John CAIRNS, Siegmund STENT et James WATSON, New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007.

énoncés prédictifs et protocole d'intervention expérimentale soit restreint aux sciences de laboratoire. En effet et c'est là sa deuxième supériorité sur la notion de manipulation, la notion d'intervention n'est pas anthropocentrée : il est donc possible de parler d'intervention et de méthode expérimentale même en astrophysique ou en cosmologie, précisément parce que ces sciences sont prédictives.

9.2.3 Prédire et expérimenter au-delà du système solaire

L'idée que l'intervention n'est pas une notion anthropocentrée est centrale dans l'argumentation de J. Woodward qui cherche à édifier une théorie de la causalité évitant cette accusation :

(IN) [la définition de l'intervention] est formulée uniquement en termes de notions comme cause ou corrélation et ne fait aucune référence aux être humains, à ce qu'ils peuvent faire ou ne pas faire. [...] Des processus qui n'impliquent aucun dispositif artificiel ou aucune action humaine peuvent être qualifiés d'intervention tant qu'ils ont les caractéristiques causales appropriées. La notion d' « expérience naturelle », négligée par les philosophes, implique l'occurrence de processus naturels qui ont les caractéristiques d'une intervention mais n'impliquent aucune action humaine ou du moins aucune action réalisée délibérément par des êtres humains⁴⁴.

En effet, la définition de l'intervention donnée par J. Woodward et que l'on utilise ici pour reformuler l'argument expérimental de I. Hacking, consiste à affirmer que si l'on peut faire varier une variable X par un processus I et que Y varie aussi (sans que I affecte aussi Y ou toute variable Z corrélée à Y), alors on a affaire à une intervention. Rien, dans cette définition, ne dit que le processus causal I a pour origine un être humain : cette donnée est tout simplement non pertinente.

⁴⁴WOODWARD, "Experimentation, causal inference and instrumental realism", p. 94.

Illustrons cela avec une expérience de pensée. Imaginons un médecin du XIX^e siècle, un Ignace Semmelweis fictif, très étonné de voir que les femmes qui accouchent dans le service de son hôpital contractent souvent une maladie nosocomiale, la fièvre puerpérale. L'hypothèse de notre médecin est que le taux d'infection est relié, d'une manière ou d'une autre, au fait que les internes qui accouchent les enfants dans ce service ne se lavent pas les mains après avoir opéré des dissections.

Pour tester son hypothèse causale, il peut intervenir directement lui-même, en forçant ces internes à se désinfecter avant tout accouchement. Mais cette désinfection peut s'imposer d'elle-même pour de toutes autres raisons, par exemple parce que les cours de dissections sont remplacés par des cours de chimie avec de l'hypochlorite de calcium, qui a un pouvoir désinfectant. Enfin, notre médecin peut se contenter de comparer le service dont il a la responsabilité à un autre service identique en tout point au sien, à la différence que les internes de ce service se désinfectent les mains avant tout accouchement.

Ces trois situations décrivent la même intervention I sur la variable *désinfection des mains* pour observer sa corrélation avec la variable *taux d'infection*. Pourtant, seule la première situation implique une action humaine délibérée.

Ces considérations permettent de critiquer la distinction traditionnelle en philosophie des sciences entre observation et expérimentation, selon laquelle l'observation serait une récolte passive d'informations sur un système, tandis que l'expérimentation se définirait par une modification délibérée de ce système. On attribue souvent cette distinction à Claude Bernard (1818-1873) qui aurait défini l'expérience scientifique comme une « observation provoquée ». Mais en réalité, Bernard *critique* cette manière de distinguer observation et expérimentation dans le premier chapitre de *L'Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* en donnant des exemples d'observations actives et réciproquement d'expériences passives : un médecin qui observe par hasard une maladie endémique fait une observation passive, mais s'il se déplace pour essayer de déterminer les facteurs de cette maladie, son observation devient active. Quelle est alors la juste distinction selon Claude Bernard ?

Dans la méthode expérimentale, la recherche des faits, c'est-à-dire l'investigation, s'accompagne toujours d'un raisonnement, de sorte que le plus ordinairement l'expérimentateur fait une expérience pour contrôler ou vérifier la valeur d'une idée expérimentale. Alors on peut dire que, dans ce cas, l'expérience est une observation provoquée dans un but de contrôle⁴⁵.

On pourrait avoir l'impression que Bernard revient à la distinction qu'il avait critiquée, mais il n'en est rien : le terme « provoquée » signifie ici « préméditée » c'est-à-dire planifiée, produite dans l'attente de certains résultats précis. Or, si l'expérience est préméditée et prend place dans un raisonnement, c'est qu'elle est préparée par un protocole qui l'organise, qu'elle est anticipée par une prédiction.

Il est donc simpliste et réducteur de définir les sciences expérimentales comme celles traitant d'objets que nous, humains, pouvons manipuler et modifier. Les sciences expérimentales sont celles où l'on peut réaliser des observations planifiées selon un protocole précis pour contrôler des hypothèses : ce sont celles dans lesquelles on trouve des prédictions techniques qui peuvent être interprétées comme des interventions expérimentales.

Si l'on adopte cette définition des sciences expérimentales, il n'y a plus lieu d'opposer les sciences du laboratoire et les sciences de l'observatoire ni d'accepter le scepticisme anti-réaliste de I. Hacking envers les objets extra-galactiques. Comme I. Hacking le relève lui-même⁴⁶, les astronomes modernes emploient souvent le terme d' « expérience », voire de « manipulation », pour parler de leurs recherches empiriques. On peut n'y voir qu'un abus de langage que la rigueur de la langue philosophique s'empressera de rectifier. Mais je pense pour ma part que les astronomes sont fondés à utiliser ces expressions parce qu'ils réalisent effectivement des interventions caractéristiques de la méthode expérimentale.

Reprenons l'exemple de la relation de Slipher-Hubble (voir sections 1.3.2 et 3.1.3) :

$$v = H_0 \cdot d$$

⁴⁵BERNARD, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, p. 49.

⁴⁶HACKING, "Extragalactic Reality : The Case of Gravitational Lensing", p. 565.

où v est la vitesse radiale (en km/s) d'une galaxie (c'est-à-dire la vitesse à laquelle elle s'éloigne de nous), d la distance de cette galaxie (en Mpc) et H_0 la constante de Hubble (en km/Mpc.s). Pour vérifier cette relation ou mesurer H_0 , l'astronome doit choisir un certain nombre de galaxies en fonction de leur distance et évaluer leur vitesse radiale. Mais la distance d'une galaxie n'est pas une variable indépendante : on ne peut pas faire varier la distance d'une galaxie en la repoussant un peu plus loin ou la rapprochant vers la nôtre. De même, la vitesse radiale d'une galaxie n'est pas non plus une variable indépendante.

C'est ici qu'entrent en jeu les prédictions, puisqu'une prédiction est une inférence permettant de fixer la valeur d'une variable sans avoir à l'observer ou la mesurer. Pour prédire la distance des galaxies, on peut utiliser différentes relations, comme par exemple celle utilisée par Hubble et découverte par Henrietta Leavitt (1868-1921) entre la période d'étoiles variables (les Céphéides) et leur magnitude. Pour prédire la vitesse radiale, on peut utiliser la relation de Doppler-Fizeau qui relie cette vitesse au décalage vers le rouge du spectre lumineux d'un objet. On peut donc réécrire la relation de Slipher-Hubble ainsi :

$$z = \frac{H_0}{c} \cdot 10^{(V+3,34 \cdot \lg(P) - 2,45 \cdot (V-I) + 7,52)/5}$$

où z est le décalage spectral (adimensionnel), c la célérité de la lumière dans le vide, P la période d'une Céphéide, V sa magnitude apparente dans le visible et I sa magnitude dans l'infrarouge proche.

Comme on le voit à nouveau avec cet exemple, les prédictions sont indispensables pour réaliser des interventions parce que ce sont elles qui permettent de savoir comment corréler des variables dépendantes à des variables indépendantes.

Ainsi, en choisissant des galaxies à différentes distances ayant des profils de spectre lumineux similaires, puis en mesurant leur décalage vers le rouge, on réalise une intervention qui consiste à faire varier seulement une variable (la distance) pour observer comment elle affecte une autre variable (la vitesse). Un tel protocole expérimental est une intervention, bien que personne ne soit capable de manipuler ces variables. L'Univers se charge par lui-même de faire cette intervention en proposant des galaxies

similaires à plus ou moins grandes distances : on a affaire à l'une de ces « expériences naturelles » que décrit J. Woodward dans la citation donnée ci-dessus.

Certes, l'impossibilité de faire varier la distance des galaxies en utilisant un dispositif construit et manipulé par un agent humain entraîne certains désagréments : on ne peut choisir n'importe quelle distance pour les galaxies ni négliger toute source de perturbation. Mais il faut remarquer que même lorsque l'on peut manipuler des variables directement dans un dispositif expérimental, on reste limité à certaines valeurs : un accélérateur de particules est limité à certaines gammes d'énergie comme un télescope est limité à une certaine résolution. De plus, il est possible, en astronomie comme dans les autres sciences physiques, de compenser certaines sources de perturbations et de construire des dispositifs qui permettent de les rendre négligeables. L'optique adaptative, par exemple, est une technique qui consiste à mesurer les perturbations d'un front d'onde lumineux provoquées par l'atmosphère terrestre et de les corriger en utilisant des miroirs dont la surface se déforme.

La différence entre les interventions réalisées en laboratoire et celles réalisées en observatoire est ainsi une différence de degré plus que de nature. Comme l'écrit Bachelard dans l'introduction du *Matérialisme rationnel*, s'il existe une chimie stellaire, c'est parce que l'on peut utiliser le « *laboratoire de la nature* »⁴⁷ : l'Univers est une source de variations suffisante pour pouvoir l'utiliser comme un laboratoire.

Il n'y a donc pas de raison de considérer, comme I. Hacking que l'astronomie et l'astrophysique restent des sciences où l'on « sauve les phénomènes »⁴⁸ à défaut de les manipuler. L'astronomie a connu bien des révolutions depuis l'antiquité. L'astrophysique, par exemple, s'est constituée au XIX^e siècle en étudiant non plus la position ou la luminosité des astres mais leurs mécanismes physiques. Cette transformation de a été rendue possible par le travail d'expérimentateurs comme Arago, Léon Foucault (1819-1868) ou Angelo Secchi (1818-1878) qui ont utilisé la spectroscopie pour connaître la composition des astres conçus désormais

⁴⁷Gaston BACHELARD, *Le Matérialisme rationnel*, Paris, Presses Universitaires de France, 1953, p. 32.

⁴⁸HACKING, "Extragalactic Reality : The Case of Gravitational Lensing", p. 576.

comme des systèmes physiques à part entière. Comme le fait remarquer S. Ruphy, les catalogues astronomiques actuels n'ont plus le même statut ni le même objectif qu'au temps d'Hipparque (comme semble le croire I. Hacking) :

Les étoiles étaient jusque là classées selon des propriétés *apparentes* : la position d'une étoile recensée dans des catalogues comme ceux de Ptolémée ou de Herschel était sa position apparente. [...]

Lorsque la diversité des spectres stellaires se révéla aux observateurs, indiquant des différences de propriétés physiques, les classificateurs d'étoiles devinrent plus ambitieux : leur objectif fut désormais d'aller au-delà des apparences pour construire des classifications fondées sur des propriétés *intrinsèques*⁴⁹.

Ainsi, les catalogues que l'on peut trouver par exemple sur le site du CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg : <http://cds.u-strasbg.fr/>) regroupent des informations sur la taille, le décalage spectral, la distance et la composition chimique des astres qu'ils classifient. Grâce à ces informations, ces catalogues permettent de faire des prédictions et de les contrôler par des interventions. Il est donc extrêmement réducteur de croire que l'astronomie aurait conservé le même style de recherche depuis l'antiquité.

On a montré dans cette section que la pratique expérimentale n'est pas exclusive mais solidaire de l'activité prédictive — parce que ce sont les énoncés prédictifs qui indiquent aux expérimentatrices les vérités de base indispensables à l'édification de dispositifs d'intervention pour produire de nouveaux phénomènes. De plus, si l'on interprète les prédictions techniques comme des protocoles d'intervention expérimentale, il est possible de redéfinir la notion d'« expérimentation » pour l'étendre au-delà des objets manipulables par des êtres humains.

Nous allons à présent voir comment appliquer l'argument expérimental en faveur du réalisme à ces succès prédictifs qui sont aussi des succès

⁴⁹RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 220.

expérimentaux, afin de justifier la croyance selon laquelle une prédiction réussie peut être le signe que le modèle ou la théorie qui a permis sa dérivation saisit bien quelque chose de la réalité.

9.3 L'argument en faveur du réalisme fondé sur les prédictions techniques

9.3.1 Reformulation de l'argument expérimental

L'argument expérimental en faveur du réalisme des entités soutient que si l'on peut construire un dispositif expérimental pour manipuler une entité théorique, alors on est convaincu de l'existence de cette entité. On aboutit ainsi à une version du réalisme scientifique qui consiste à croire en l'existence de ces entités et des pouvoirs causaux permettant de les manipuler.

J'ai montré que cette notion de manipulation pose un certain nombre de problèmes que l'on peut éviter en la redéfinissant par celle d'intervention expérimentale sur une ou plusieurs variable(s) de ces entités théoriques. Or, une intervention expérimentale suppose un protocole d'expérience qui prédit quelles variables indépendantes modifier et comment les modifier pour affecter la ou les variables dépendantes de ces entités. Ainsi, toute intervention expérimentale est une prédiction technique de la forme : *si l'on fait varier les valeurs des variables indépendantes X_1, \dots, X_m , alors on fera varier les valeurs des variables dépendantes corrélées Y_1, \dots, Y_n et l'on observera le phénomène P* ⁵⁰.

Les prédictions de ce type sont des prédictions *techniques*. Lorsqu'une telle prédiction réussit, c'est-à-dire lorsque des expérimentatrices entreprennent la construction de dispositifs expérimentaux pour réaliser cette intervention expérimentale et réussissent suffisamment souvent, à l'aide de ces dispositifs, à produire de manière stable et répétable de nouveaux phénomènes, alors on a affaire à un succès prédictif technique. Même si

⁵⁰Ce phénomène P peut consister en l'apparition d'un effet physique, la valeur d'une nouvelle variable Z ou la corrélation de plusieurs variables. Cela importe peu ici, tant que l'on a un moyen d'observer ou de mesurer P indépendamment de l'intervention I .

les nouveaux phénomènes diffèrent sensiblement de P , la prédiction technique peut être considérée comme un succès. C'est toute la différence avec l'argument du miracle qui repose sur la capacité d'une théorie à prédire un phénomène donné tant que l'on a bien réussi à produire une méthode d'intervention stable sur certaines variables.

On peut donc reformuler l'argument expérimental en faveur du réalisme en termes de succès prédictif : *lorsque l'on a affaire à un succès prédictif technique, alors est convaincu de l'existence des entités et des variables dépendantes sur lesquelles on intervient qui sont corrélées au dispositif expérimental et au phénomène sur lequel on expérimente.*

Il est important de noter qu'il n'est pas besoin d'accorder à J. Woodward que toute intervention expérimentale définit une relation de dépendance causale. En effet, comme l'a montré M. Kistler, il existe au moins deux limites à la conception interventionniste de la causalité⁵¹. Le premier problème soulevé par M. Kistler est que l'on peut intervenir sur une variable qui est corrélée de manière non causale à une autre par une relation de dépendance exprimée par une loi d'association. Le second problème soulevé par M. Kistler est qu'il est souvent difficile, voire impossible, de réaliser des interventions sur une seule variable dans des systèmes régis par des lois d'association.

Les arguments de M. Kistler montrent qu'il ne faut pas interpréter toute intervention expérimentale comme la mise en lumière d'une relation de causalité. Tout ce à quoi l'on peut conclure, après le succès d'une intervention expérimentale, c'est qu'il y a une corrélation entre deux variables (ou deux ensembles de variables) qui ne font pas intervenir d'autres variables (ou ensembles de variables). L'argument expérimental en faveur du réalisme que l'on construit ici ne repose donc pas sur la notion de *causalité*. Contrairement à ce que soutiennent I. Hacking ou A. Chakravartty, ce n'est pas parce que nous agissons sur certaines entités ou que certaines entités agissent sur nous lorsque nous faisons des interventions expérimentales que nous y croyons. Il faut et il suffit qu'une intervention expérimentale mette en lumière des corrélations entre variables indépen-

⁵¹Voir Max KISTLER, "The Interventionist Account of Causation and Non-Causal Association Laws", *Erkenntnis* 78.1 (2013), p. 1–20.

dantes et dépendantes pour que l'on soit convaincu de l'existence de ces dernières.

Ainsi reformulé, l'argument expérimental semble perdre une partie de sa force intuitive, parce que l'on abandonne l'idée anthropocentrée d'une manipulation directe d'entités théoriques. Mais cette reformulation revient à affirmer que ce n'est pas n'importe quel succès prédictif qui devrait nous engager ontologiquement : prédire l'apparition d'un phénomène ne suffit pas, il faut aussi prédire comment — par quelle technique expérimentale — on peut le découvrir. Une prédiction technique n'est pas le fait de deviner un phénomène encore inconnu, c'est la mise en évidence du moyen de découvrir de nouveaux phénomènes.

Autrement dit, les succès prédictifs techniques ne nous impressionnent pas parce qu'ils tombent juste à propos d'un phénomène prédit, mais parce qu'ils ont la capacité de diriger les recherches expérimentales en indiquant les conditions pour réaliser un dispositif stable et fiable. On leur fait confiance de la même manière que l'on fait instinctivement confiance à toutes les technologies qui nous entourent et qui reposent sur des applications de théories scientifiques. Voilà pourquoi l'argument en faveur du réalisme fondé sur ces succès prédictifs ne nous engage pas, comme le souligne à plusieurs reprises I. Hacking, envers les phénomènes *sur lesquels on expérimente*, mais envers *ce qui est requis* pour pouvoir expérimenter sur eux.

Ainsi, même si l'on a perdu une partie de la force intuitive de l'argument original de I. Hacking, on a gardé le cœur : sa résistance à l'induction pessimiste. En effet, les méthodes pour intervenir sur un phénomène peuvent être oubliées, comme on a oublié certaines techniques des savants du passé en même temps que leurs instruments ont disparu des laboratoires⁵². Elles peuvent aussi être raffinées et leur domaine d'application être précisé. Mais lorsqu'une révolution scientifique change complètement notre conception des phénomènes sur lequel on intervient, on peut continuer à les utiliser. Les succès prédictifs techniques restent des succès, même lorsqu'ils sont réinterprétés dans le cadre d'une nouvelle théorie ayant des

⁵²C'est ainsi que l'on comprend toujours difficilement comment Antoni von Leeuwenhoek (1632-1723) a pu réussir à faire des observations microscopiques d'une telle précision avec les instruments dont il disposait.

postulats différents sur la nature de la réalité.

Notre conception de la lumière, par exemple, a été fortement transformée depuis l'époque où Arago réalisa une expérience pour contrôler la prédiction du point lumineux. Et pourtant, on continue à intervenir de la même manière sur la lumière pour faire apparaître ce phénomène, alors même que l'on utilise aujourd'hui comme source lumineuse ponctuelle des lasers dont la construction repose sur une conception *quantique* et non ondulatoire de l'optique.

On examine précisément, à la fin de ce chapitre, à quelle conception du réalisme aboutit cet argument fondé sur les succès prédictifs techniques. Mais il faut dès à présent préciser qu'il ne suppose en aucune mesure que les prédictions techniques aient été réalisées *avant* la construction d'un dispositif expérimental. En effet, comme je l'ai dit, les prédictions techniques ne précèdent ni logiquement ni chronologiquement les expériences scientifiques : elles anticipent l'expérience en ce sens uniquement qu'elles sont interprétables en termes de protocoles d'expérimentation.

Réciproquement, lorsqu'une équipe d'expérimentateurs mettent en lumière un nouvel effet expérimental, celui-ci peut être expliqué par une théorie si son protocole expérimental est interprété comme un énoncé prédictif auquel doit aboutir une série d'inférences dérivée de cette théorie. C'est cette possibilité d'interactions entre des connaissances théoriques et des dispositifs expérimentaux qui constitue l'*applicabilité* des théories à l'expérience *via* leurs prédictions que décrit Bachelard dans le premier chapitre du *Rationalisme appliqué* :

Le contact *expérience* et *mathématiques* se développe en une solidarité qui se propage. Quand c'est l'expérimentation qui apporte le premier message d'un phénomène nouveau, le théoricien n'a de cesse de modifier la théorie régnante pour qu'elle puisse assimiler le fait nouveau. Avec cette modification — sans doute tardive — le mathématicien montre que la théorie, un peu assouplie, *aurait dû prévoir* la nouveauté. [...]

Naturellement, de ce retour après coup, vers les sources de la prévision théorique, personne ne se moque, l'expérimentateur moins que tout autre. Au contraire, l'expérimentateur se

félicite de l'assimilation de sa découverte par les mathématiques. Il sait qu'un fait nouveau rattaché à l'aspect moderne de la théorie régnante reçoit les garanties d'une objectivité surveillée en profondeur, la théorie régnante étant un système d'examen expérimental, en action dans les plus clairs cerveaux de l'époque. On a l'impression que le problème est *bien vu*, du seul fait qu'il *aurait pu être prévu*. La perspective théorique *place* le fait expérimental où il doit être⁵³.

En somme, une fois reformulé comme nous l'avons fait, l'argument expérimental en faveur du réalisme est équivalent à cette thèse bachelardienne : « c'est par ses applications que le rationalisme conquiert ses applications objectives », puisque ce sont les succès prédictifs techniques qui permettent à une théorie scientifique de « porter ses preuves de fécondité jusque dans l'organisation de la pensée technique »⁵⁴, c'est-à-dire qui constituent des succès suffisants pour nous assurer qu'une théorie est *objective*, au sens où elle traite bien d'objets réellement existants.

Nous allons à présent examiner deux exemples de tels succès prédictifs techniques pour pouvoir déterminer plus précisément la portée de cet argument en faveur du réalisme scientifique : la prédiction du point lumineux par l'optique ondulatoire de Fresnel et la prédiction des trous noirs par la théorie de la relativité générale.

9.3.2 La prédiction du point lumineux

On a déjà vu quel était le dispositif expérimental mis en place pour réaliser les conditions imposées par l'énoncé prédictif dérivé de l'optique ondulatoire de Fresnel et ainsi faire apparaître un point lumineux dans l'ombre d'un objet circulaire. Examinons à présent à quoi nous engage ce succès prédictif technique. Il est clair que cette réussite ne nous détermine pas à croire que la lumière soit une onde, ni même, comme le soutiennent Poincaré ou J. Worrall, que les équations de Fresnel soient vraies.

⁵³Gaston BACHELARD, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses Universitaires de France, 1949, p. 2.

⁵⁴BACHELARD, *Le Rationalisme appliqué*, p. 4.

En revanche, d'après l'argument expérimental tel que nous l'avons reformulé, nous sommes portés à croire en l'existence des variables dépendantes sur lesquelles nous intervenons et celles qui sont corrélées au phénomène expérimental du point lumineux. Or, en choisissant une source lumineuse ponctuelle, un obstacle de profil circulaire d'un certain diamètre et les bonnes dimensions entre ces éléments, on intervient sur la diffraction et les interférences des rayons lumineux. Celles-ci sont à leur tour corrélées à l'intensité de la lumière au centre de l'ombre de l'obstacle sur l'écran, par la relation de proportionnalité entre l'intensité lumineuse et le carré d'une certaine propriété de la lumière. On est donc ontologiquement engagé envers cette proposition : *la lumière a une propriété continue périodique qui est responsable de sa diffraction et de ses interférences, dont le carré est proportionnel à son intensité.*

Cette conclusion rejoint celle à laquelle on avait déjà abouti dans le chapitre 8 (section 8.3.2) lorsque l'on avait comparé les hypothèses communes aux deux dérivations du point lumineux, celle de Poisson et celle de Fresnel. Cela confirme que les « vérités de base » nécessaires à la construction d'un dispositif expérimental sont communes aux différentes interprétations théoriques que l'on peut faire du même phénomène prédit, comme l'affirme I. Hacking.

C'est pourquoi on ne peut presque rien dire de cette *propriété continue* de la lumière sur laquelle on intervient pour construire le dispositif expérimental qui fait apparaître le point lumineux, sinon qu'elle existe et qu'elle est reliée à des variables indépendantes. En étudiant les expériences menées par Fresnel et Arago sur la polarisation de la lumière, le philosophe des sciences Juha Saatsi fait la même remarque : « dans ce cas, il n'est fait référence qu'aux caractéristiques de la propriété continue de la lumière (quantifiée par Q) telle que Q est proportionnelle à I et au carré de l'indice de réfraction, n^2 »⁵⁵. Pour J. Saatsi, de telles propriétés comme Q sont « multi-réalisables » : différentes théories peuvent interpréter Q différemment parce qu'il existe plusieurs propriétés P telles que

⁵⁵Juha SAATSI, "Reconsidering the Fresnel-Maxwell Theory Shift : How the Realist can Have her Cake and EAT It Too", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 36.3 (2005), p. 509–538, p. 525.

si une entité e a la propriété P , alors e a la propriété Q ⁵⁶. Pour reprendre notre exemple, on peut interpréter la propriété continue de la lumière à laquelle on est engagé ontologiquement soit comme *la vitesse absolue de particules d'éther*, soit comme *l'amplitude d'une onde lumineuse*, soit encore comme *une perturbation électromagnétique*, parce que ces différentes propriétés réalisent toutes la même propriété qui est corrélée avec la racine carrée de l'intensité lumineuse.

A. Chakravartty, lorsqu'il étudie le cas de Fresnel, semble arriver à la même conclusion : « on peut ainsi définir les propriétés détectables comme celles qui sont requises par une interprétation minimale des équations »⁵⁷ de Fresnel. Tout le problème est de savoir à quel point cette interprétation est *minimale*. A. Chakravarttyne donne pas de méthode précise pour limiter cette interprétation, mais il propose dans le cas de Fresnel de ne retenir que les propriétés suivantes : l'intensité et la direction de propagation :

Supposer en outre que la direction de propagation est une propagation dans l'éther, c'est aller au delà de l'interprétation minimale requise pour cet ensemble particulier d'équations. [...] Cette prescription peut sembler sévère à certains, parce qu'elle demande aux réalistes de réfréner leur engagement envers les parties des théories qui jouent un rôle explicatif, et les réalistes ont un faible pour les explications⁵⁸.

Il me semble qu'ici A. Chakravartty est en accord avec l'analyse de J. Saatsi (qu'il cite directement) et celle que l'on propose ici : l'interprétation minimale que l'on donne des postulats d'une théorie n'a pas pour objectif de rendre vraie son explication des phénomènes mais seulement d'accorder une existence aux propriétés qui jouent un rôle dans la prédiction technique d'un phénomène. Mais comme on le montre dans la conclusion du chapitre, une telle analyse mène à un réalisme scientifique qui se doit d'être fort modeste pour rester cohérent.

⁵⁶SAATSI, "Reconsidering the Fresnel-Maxwell Theory Shift", p. 533.

⁵⁷CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 49.

⁵⁸CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, p. 53.

La prédiction du point lumineux ne nous engage ainsi pas à croire en l'intégralité de la théorie de Fresnel ni même en son « contenu structural » ou en ses postulats centraux. Elle nous mène seulement à accepter l'existence d'une certaine propriété de la lumière corrélée aux variables indépendantes décrites dans les conditions qui constituent l'antécédent de la prédiction technique du point lumineux.

9.3.3 La prédiction des ondes gravitationnelles

La prédiction et la détection des ondes gravitationnelles présentent un double intérêt :

- Il s'agit d'un succès récent, qui montre que l'argument en faveur du réalisme fondé sur les succès prédictifs techniques n'a pas besoin du point de vue surplombant d'une théorie postérieure pour être appliqué à des cas concrets, à la différence de la stratégie *divide et impera* par exemple.
- Ce succès appartient au domaine de l'astrophysique, domaine auquel l'argument expérimental de I. Hacking n'est pas censé s'appliquer.

Les ondes gravitationnelles ont été prédites dès 1916 par Einstein. Cette prédiction découle naturellement de la relativité générale puisque celle-ci considère la gravitation comme un champ qui peut être perturbé. De même que la perturbation d'un champ électromagnétique engendre une onde électromagnétique, de même la perturbation d'un champ gravitationnel devrait engendrer une onde gravitationnelle. Puisque le champ gravitationnel fixe la métrique et la géométrie de l'espace-temps, une onde gravitationnelle est une déformation périodique de l'espace-temps. Einstein a prédit que ces ondes existaient, se propageaient à la vitesse de la lumière et de manière transversale, mais aussi que leur faible amplitude rendait leur détection sinon impossible, du moins très difficile.

La première détection directe⁵⁹ de ces ondes eut effectivement lieu un siècle plus tard, le 14 septembre 2015 et fut réalisée par l'équipe de

⁵⁹Une première détection indirecte de ces ondes eut lieu en 1975 lorsqu'on se rendit compte que le système PSR B1913+16 constitué de deux pulsars perdait de l'éner-

l'expérience LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), expérience composée de deux interféromètres de Michelson géants. Le principe de cette expérience est qu'une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps et par conséquent décale la différence de phase d'un rayon laser séparé en deux rayons perpendiculaires. En faisant interférer ces deux rayons, on peut détecter le passage et le profil d'une onde gravitationnelle. Cela requiert une très grande précision pour un dispositif gigantesque : les bras des interféromètres de LIGO mesurent chacun quatre kilomètres de longueur et doivent être sensibles à une déformation de l'ordre de $10^{-21}m$ (la taille d'un proton est de l'ordre du femtomètre, soit $10^{-15}m$)

Dans l'article annonçant leur découverte l'équipe LIGO et l'équipe VIRGO (une autre expérience de détection des ondes gravitationnelles) restent très prudentes quant à la capacité de leurs résultats à confirmer la théorie de la relativité générale : elles se contentent de noter qu'ils ne présentent « aucune preuve de désaccord avec la relativité générale »⁶⁰. En revanche, elles sont bien plus confiantes en l'existence et les propriétés de la source de l'onde qu'elles ont détectée : « GW150914 démontre l'existence de trous noirs de masses stellaires supérieures à 25 masses solaires et établit que les trous noirs binaires peuvent se former dans la nature et fusionner en un temps comparable au temps de Hubble »⁶¹.

En effet, en utilisant l'équation qui relie l'amplitude et la fréquence d'une onde gravitationnelle à la masse du système susceptible de l'engendrer, les équipes de LIGO et VIRGO peuvent être assurées que seul un événement impliquant de grandes masses n'ayant pas de rayonnement visible et ayant un caractère périodique (avec une fréquence élevée) peut engendrer une onde gravitationnelle détectable par leurs instruments :

Une paire d'étoiles à neutrons, quoique compacte, n'aurait

gie et que cette perte de l'énergie ne pouvait s'expliquer que par l'émission d'ondes gravitationnelles.

⁶⁰LIGO, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Physical Review Letters* 116 (6 2016), p. 061102, p. 8.

⁶¹LIGO, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", p. 8. Le temps de Hubble est l'échelle de temps correspondant à l'âge de l'Univers depuis le big bang : dans le modèle cosmologique actuel, il est de l'ordre de la dizaine de milliard d'années.

pas la masse requise, alors qu'un système binaire avec une étoile à neutron et un trou noir aurait une masse totale très importante et devrait ainsi fusionner à une fréquence bien plus faible. Les seuls objets *connus* suffisamment compacts qui peuvent atteindre une fréquence orbitale de $75Hz$ sans contact sont les trous noirs⁶²

Comme on le voit, les auteurs laissent ouverte la possibilité que des objets inconnus, autres que des trous noirs, puissent avoir engendré le signal perçu par LIGO. Mais ils sont certains de la masse minimale requise et de la fréquence de l'événement qui a engendré l'onde gravitationnelle qu'ils ont détectée. Ce qui est intéressant, c'est que cet événement lui-même est décrit par des modèles qui ne sont pas tous relativistes et impliquent d'autres théories que la relativité générale, comme la mécanique quantique et la dynamique post-newtonienne⁶³. Il n'en saurait être autrement puisque, comme on l'a vu, les trous noirs sont des singularités que l'on ne peut pas décrire complètement avec les postulats de la théorie de la relativité générale. Ces modèles décrivent deux trous noirs ayant des orbites spirales qui aboutissent à leur fusion (voir figure 9.4).

On peut par conséquent considérer cette expérience comme en une intervention : les variables indépendantes sont les dimensions de l'appareil LIGO et de l'interférence entre les rayons lasers, les variables dépendantes sont la fréquence et la masse du système binaire perturbant le champ gravitationnel, ainsi que l'amplitude de cette déformation de l'espace-temps. Certes, cette intervention pourrait être améliorée pour s'approcher des canons de manipulation en laboratoire, par exemple si l'on était capable de

⁶²LIGO, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", p. 2. Je souligne.

⁶³La modélisation de la fusion de deux trous noirs qu'utilisent les équipes de LIGO et VIRGO s'appuie en grande partie sur le modèle exposé dans Luc BLANCHET et al., "Gravitational-Radiation Damping of Compact Binary Systems to Second Post-Newtonian Order", *Physical Review Letters* 74 (18 1995), p. 3515–3518. Ce modèle est « post-newtonien » au sens où il utilise la théorie de la gravitation newtonienne avec une correction pour les masses importantes afin de prendre en compte les effets relativistes. Ces modèles illustrent clairement ce que I. Hacking fait remarquer à plusieurs reprises : on peut utiliser des modèles fondés sur des théories différentes et incompatibles entre eux pour construire différentes parties d'un même dispositif expérimental.

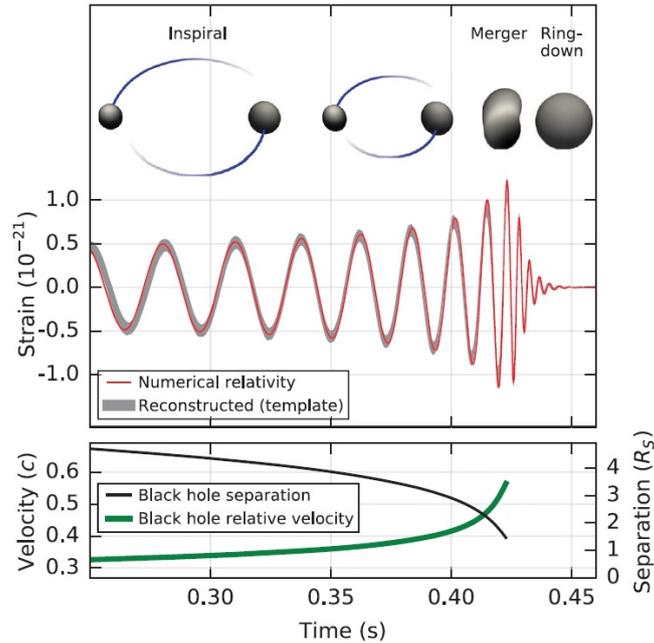


FIGURE 9.4 : Le modèle de trous noirs en coalescence ayant prédit le profil de l'onde gravitationnelle détectée par Ligo. *En haut* : le scénario modélisé : deux trous noirs en orbites spirales aboutissant à une coalescence (fusion). *En dessous* : la projection de l'onde gravitationnelle engendrée dans ce scénario sur le détecteur H1 de Ligo, avec en abscisses le temps (en secondes) et en ordonnées la déformation. *En bas* : la vitesse relative et la distance séparant les deux trous noirs (en ordonnée), en fonction du temps (en abscisse).

Source : LIGO, "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", *Physical Review Letters* 116 (6 2016), p. 061102, p. 2.

repérer à l'avance et de choisir les systèmes binaires sources d'ondes gravitationnelles. Mais sans la croyance en l'existence de ces corps compacts et massifs ayant des vitesses relatives importantes (des « trous noirs » d'après notre description théorique actuelle), la recherche d'ondes gravitationnelles n'aurait pas pris la forme d'expériences d'interférométrie comme LIGO.

Si l'on applique l'argument en faveur du réalisme fondé sur les succès prédictifs techniques à la prédiction des ondes gravitationnelles, on se rend compte qu'elle ne repose ni sur la croyance en l'existence d'ondes gravitationnelles (c'est ce qui était testé) ni sur la croyance en une description théorique unifiée des trous noirs, mais sur la croyance en l'existence de ces *corps massifs et compacts* que nous caractérisons actuellement comme des trous noirs.

Ainsi, même si l'on a peu de connaissances théoriques sur les trous noirs et que l'on est loin d'en avoir une description théorique complète, on en sait suffisamment sur leur masse et sur leur rayon pour prédire que les orbites spirales de tels corps peuvent être corrélées à des perturbations de l'espace-temps, perturbations que l'on peut ensuite détecter dans un interféromètre comme celui de LIGO. Ce sont les seules « vérités de base » dont avaient besoin les équipes de LIGO et de VIRGO pour avoir confiance en leur dispositif expérimental.

L'exemple de la détection des trous noirs montre par conséquent que l'on est convaincu de l'existence de l'entité que l'on manipule et non de l'existence de celle que l'on détecte par cette manipulation. Mais elle prouve aussi que l'on peut intervenir sur des trous noirs et croire en leur existence contrairement à ce que soutenait I. Hacking. Même si la modélisation des trous noirs et de l'Univers vient à changer radicalement au cours d'une prochaine révolution scientifique, il faudra rendre compte d'une entité ou d'un événement qui a les pouvoirs causaux nécessaires pour produire les signaux enregistrés par LIGO.

On peut ainsi appliquer l'argument en faveur du réalisme fondé sur les succès prédictifs techniques à des cas concrets de succès expérimentaux actuels, à la condition, comme on le montre dans la conclusion de ce chapitre, d'être suffisamment attentif à ne pas confondre un ensemble de

variables dépendantes et la description théorique d'une entité à laquelle on attribue ces variables comme propriétés.

9.4 Conclusion : prédiction et objectivité

Quelle version du réalisme ces succès prédictifs techniques permettent-ils de soutenir ? On serait bien en peine de montrer qu'il s'agit plus d'un réalisme des entités que d'un réalisme théorique ou réciproquement. Dans la version originale de l'argument expérimental de I. Hacking, on est engagé ontologiquement envers l'existence d'entités, parce qu'elles sont l'objet des manipulations expérimentales. Pour J. Woodward, qui s'appuie sur un argument similaire à celui de I. Hacking mais utilise la notion d'intervention, est amené à croire en des *relations de dépendance causale* :

Certaines portions de ce que l'on peut décrire comme les relations de dépendance ou de manipulabilité reconnues par T_1 et T_2 resteront à peu près les mêmes par-delà les changements d'ontologie fondamentale. [...] Lors de tels changements, de nouvelles relations de dépendance sont dans une large mesure retenues, même si elles peuvent se révéler n'être qu'approximativement correctes ou avoir un domaine d'application plus restreint que ce que l'on supposait auparavant⁶⁴.

Pourtant, I. Hacking et J. Woodward semblent parler de la même chose, puisque les entités de I. Hacking ne sont que le support de pouvoirs causaux et les relations de dépendance de J. Woodward relie des variables qui sont les propriétés de certaines entités théoriques. Force est de constater que le constat d'A. Chakravartty selon lequel « le réalisme structural et le réalisme des entités, compris correctement, ont exactement les mêmes implications concernant l'existence des entités et la connaissance de leurs propriétés »⁶⁵ semble correct.

⁶⁴WOODWARD, "Experimentation, causal inference and instrumental realism", p. 113.

⁶⁵CHAKRAVARTTY, "Semirealism", p. 392.

Ainsi, plutôt que de chercher à savoir qui de la substance ou de la relation vient en premier, on peut se contenter de remarquer que les prédictions techniques isolent un certain nombre de corrélations entre des variables indépendantes et dépendantes et que si l'on cherche à réaliser ces prédictions dans des dispositifs expérimentaux d'intervention, c'est que l'on croit en la réalité de ces relations, mais aussi en l'existence de l'objet défini par ces relations. Autrement dit, on croit bien que ces relations ont un *objet*, c'est-à-dire qu'elles corrélerent les variables indépendantes d'un dispositif expérimental à *quelque chose*, même si l'on n'a pas de description de ce quelque chose qui excède la description de ses corrélations et permette d'en connaître la nature.

Par conséquent, ce dont nous convainquent les succès prédictifs techniques, c'est de l'*objectivité* des relations entre variables indépendantes et dépendantes, en ce sens que l'on ne peut considérer que ces prédictions représentent des succès expérimentaux sans croire que les variables indépendantes sur lesquelles on intervient ont un *corrélat* qui existe réellement. Comme l'avait remarqué M. Morriison, cette croyance est la condition de possibilité pour croire qu'il y a bien un sens à réaliser de telles interventions expérimentales.

Si l'argument expérimental est un argument transcendantal comme le soutient M. Morriison, alors le réalisme scientifique change de statut. Ce n'est plus une position que l'on est libre ou non de choisir comme le prétend A. Chakravartty, mais au contraire une thèse que l'on adopte naturellement lorsque l'on s'engage dans des pratiques expérimentales. C'est en ce sens, me semble-t-il, que l'on peut justifier l'affirmation de Duhem selon laquelle la croyance au caractère naturel (c'est-à-dire réel) d'une classification théorique est un « acte de foi » : ce n'est pas une croyance religieuse sans raison, mais une croyance qui rend possible certaines pratiques parce qu'elles donnent sens à ces pratiques.

Les prédictions et les expériences de Fresnel et d'Arago montrent par exemple qu'il y a un sens à parler d'une propriété spatiale continue de la matière corrélée à son intensité. De même, la prédiction des ondes gravitationnelles prouve qu'il est sensé de croire en l'existence d'objets de plusieurs dizaines de masses solaires ayant des fréquences de rotation

de l'ordre de la dizaine de hertz, sans que l'on puisse plus s'avancer pour l'instant sur la nature de ces propriétés et de ces objets ⁶⁶.

L'argument en faveur du réalisme fondé sur les succès prédictifs techniques ne va donc pas plus loin que la modestie dont fait preuve I. Hacking au sujet de son propre argument :

De nombreux Pères de l'Église [...] croyaient que Dieu existe, mais ils croyaient qu'il était en principe impossible de formuler aucune vraie théorie à son sujet. Au mieux, on pouvait dresser une liste de ce que Dieu n'était pas — ni fini, ni limité, etc. Si l'on applique cela aux entités scientifiques, on peut dire que l'on a de bonnes raisons de supposer que les électrons existent, même si aucune description totale des électrons n'a aucune chance d'être vraie. Nos théories sont constamment révisées; on utilise différents modèles d'électrons à différentes fins et on ne croit pas qu'ils soient littéralement vrais; et pourtant les électrons existent⁶⁷.

On peut penser que l'on arrive ainsi à un réalisme si humble qu'il ne se distingue plus de l'antiréalisme que parce que l'on accepte l'existence d'une objectivité. Or, certains auteurs qui se déclarent anti-réalistes ou *néo-instrumentalistes* admettent aussi cette objectivité. C'est le cas par exemple de Kyle Stanford qui, dans *Exceeding our grasp*⁶⁸, soutient que

⁶⁶Chaque cas de prédiction technique réussie doit être examiné spécifiquement et minutieusement pour évaluer son engagement ontologique, parce que la distinction entre variable dépendante et indépendante dépend de chaque contexte expérimental. Par exemple, dans une expérience d'optique comme celle de Fresnel, la distance entre les différents éléments du dispositif est une variable indépendante, tandis qu'en astrophysique, la distance est en règle générale une variable dépendante. Il ne s'agit pas là d'un coupable aveu d'opérationnalisme mais d'un constat pluraliste : je pense qu'il est impossible de trouver une formule générale qui permette de déterminer quelles sont les propriétés réelles du monde pour toutes les sciences sans se pencher sur les spécificités de chacune de ces disciplines, de leur domaine et de leurs méthodes. Je rejoins sur ce point les analyses de S. Rupy sur la notion d'espèces naturelles : « en renonçant à appliquer un seul concept d'espèce naturelle à toutes les sciences, le débat sur l'existence de telles espèces en science devient ainsi *interne* à chaque discipline, gagnant en pertinence au regard des pratiques effectives des chercheurs ce qu'il perd en portée métaphysique général », RUPHY, *Pluralismes scientifiques*, p. 249.

⁶⁷HACKING, *Representing and Intervening*, p. 27.

⁶⁸STANFORD, *Exceeding our grasp : Science, history, and the problem of unconceived alternatives*.

l'on peut expliquer le succès de nos théories confirmées en considérant qu'elles sont en rapport de *similarité prédictive* avec une théorie vraie qui décrirait fidèlement la réalité, bien que l'on ne sache rien de cette théorie ni de la vraie nature de la réalité.

La modestie de ce réalisme scientifique n'est que l'impôt que l'histoire des sciences prélève sur notre confiance à l'égard des théories couronnées de succès. En effet, l'induction pessimiste ne nous laisse pas affirmer plus que ceci : on peut être certain que les techniques d'intervention expérimentale survivront aux prochaines révolutions scientifiques même si l'interprétation de leurs résultats vient à changer radicalement.

La position réaliste à laquelle on aboutit est donc la suivante : *il y a une objectivité des théories scientifiques, en ce sens que les variables indépendantes qui apparaissent dans les prédictions techniques réussies ont un corrélat objectif. Mais on ne peut pas savoir ce qui, dans notre description théorique de ce corrélat objectif, est vrai et sera retenu dans les théories postérieures.*

La position réaliste esquissée ici s'expose sûrement à des objections, elle conjugue trois intérêts majeurs :

1. *Elle attribue une objectivité aux théories scientifiques sans faire de l'avenir de la science un processus prédictible.* En effet, elle ne pose aucune contrainte sur la manière dont les variables dépendantes corrélées aux variables indépendantes doivent être interprétées et donc laisse libre champ à l'imagination scientifique d'inventer de nouvelles théories qui peuvent potentiellement transfigurer notre image scientifique des propriétés ou des entités quiinstancient ces variables.
2. *Elle respecte l'attitude réaliste naturelle souvent adoptée dans une recherche scientifique* qui consiste à ne pas douter de la réalité des objets avec lesquels on travaille, même si l'on n'est jamais certains que l'image que l'on s'en fait soit correcte.
3. *Elle combine les avantages pragmatiques du réalisme et de l'antiréalisme* : on peut caractériser les discours scientifiques qui ont connu des succès prédictifs techniques comme *objectifs* et ainsi être

fondés à les distinguer des discours religieux, mythologiques ou des affabulations pseudo-scientifiques. Mais on ne peut pas pour autant légitimement transformer ces discours scientifiques en idéologie naturalisant des préjugés socio-culturels comme le racisme ou le sexisme, puisqu'il est impossible d'être certain que l'on a découvert la nature de cette objectivité.

Conclusion de la quatrième partie : un réalisme sans métaphysique

Est-ce qu'une théorie couronnée de succès prédictifs est vraie ? Quels succès prédictifs sont nécessaires et suffisants pour pouvoir la considérer digne de foi ? En quelle mesure est-elle partiellement ou approximativement vraie ?

On peut désormais apporter des éléments de réponse à ces questions que nous avons posé au début de cette partie. Nous avons une intuition, un instinct, ou du moins un biais psychologique qui nous pousse à croire qu'une théorie qui fait des prédictions qui tombent juste ne peuvent pas être complètement fausses. Comment aurions-nous pu, par pure chance, prédire avec précision des phénomènes aussi improbables que l'apparition d'un point lumineux dans l'ombre d'un écran circulaire, ou aussi discrets que la déviation de $10^{-21}m$ d'un rayon laser ayant parcouru plus de quatre kilomètres ?

Mais ce que nous nous sommes efforcés de montrer dans le chapitre 8, c'est que si l'on en reste à une telle caractérisation des succès prédictifs, il est particulièrement difficile de justifier comme de clarifier cette intuition :

- incapables de la *justifier*, parce qu'il est impossible de l'asseoir sur un argument qui ne tombe pas sous les coups d'objections historiques comme l'induction pessimiste mais qui ne soit pas circulaire, c'est-à-dire qui ne présuppose pas la vérité de nos théories actuelles ;
- incapables de la *clarifier*, parce qu'il est impossible de savoir quelles parties de notre image théorique du monde représentent fidèlement la réalité.

Une des principales raisons de cette double impossibilité est que, comme nous l'avons vu tout au long de cette thèse, les prédictions sont protéiformes : il n'existe pas une mais de nombreuses manières de prédire différentes et ainsi de dériver le même énoncé prédictif. On ne peut donc pas proclamer avec certitude qu'un postulat théorique est vrai parce qu'il serait indispensable à l'accomplissement d'un succès prédictif.

C'est pourquoi un changement de perspective s'est imposé dans le chapitre 9 : nous n'avons plus concentré notre analyse sur les dérivations des prédictions — toujours ouvertes à l'infinité des alternatives possibles — mais sur les énoncés prédictifs auxquelles elles aboutissent. Et nous avons vu qu'il était possible de circonscrire une classe d'énoncés prédictifs représentant des prédictions d'un genre spécifique : ceux qui prédisent par quelle intervention expérimentale il est possible de produire un phénomène ou d'instancier une loi.

Lorsque ces prédictions réussissent à produire des dispositifs expérimentaux stables et répétables, je les ai appelées des *succès prédictifs techniques* et j'ai soutenu que l'on ne pouvait pas les considérer comme des succès sans croire en l'existence réelle des variables dépendantes auxquelles sont corrélées les variables indépendantes qui apparaissent dans les prédictions techniques.

Il est donc bien possible de *justifier* l'intuition selon laquelle les prédictions réussies révèlent l'objectivité des théories scientifiques, si l'on se concentre sur ces succès prédictifs techniques, et si l'on se contente d'affirmer que seul peut être prouvé le fait que certaines variables de ces théories ont une réalité.

Peut-on *clarifier* cette intuition comme on l'a justifiée ? Peut-on utiliser les succès prédictifs pour savoir quelles parties de notre représentation théorique du monde sont dignes de foi ? Autrement dit, peut-on, en examinant les succès prédictifs d'une théorie, glaner quelques connaissances sur ce qui existe réellement dans la nature ?

L'objectif ici n'est pas de fournir un panorama de toutes les conceptions réalistes possibles ni de soutenir une position particulière dans le débat entre réalisme et antiréalisme. La seule ambition de cette thèse est d'évaluer la portée des succès prédictifs. Et il semble que l'analyse des nombreux succès prédictifs que connaît l'activité scientifique ne puisse nous mener plus loin qu'un réalisme scientifique ne contenant quasiment aucune connaissance métaphysique (mais rien ne dit que l'on ne puisse accéder à cette connaissance par d'autres moyens).

En effet, aucun des arguments fondés sur les succès prédictifs examinés dans cette partie ne permet de donner une définition *opératoire*

de la notion de vérité partielle, c'est-à-dire une méthode applicable aux théories scientifiques pour déterminer lesquels de leurs postulats sont dignes de foi. Les arguments inspirés de l'argument du miracle reposent sur la notion d'indispensabilité prédictive, notion dont nous avons vu les limites dans le chapitre 8. Et l'argument expérimental en faveur du réalisme examiné dans le chapitre 9, n'attribue lui non plus aucune vérité aux interprétations théoriques des entités et des propriétés qui sont les rouages des dispositifs d'interventions expérimentales.

Par conséquent, même si l'on peut justifier une intuition suffisamment forte pour nous convaincre que les théories scientifiques ayant connu des succès prédictifs ont une objectivité, les succès prédictifs ne semblent pas être suffisants savoir quels postulats de nos théories actuelles reflètent la réalité.

Mais si l'on admet qu'une théorie a une objectivité, n'est-ce pas dire qu'elle est vraie ? Et si l'on affirme qu'elle est vraie, pourquoi ne pas croire que ses postulats le sont aussi et nous fournissent une authentique connaissance des structures et des entités qui composent la réalité ? Certes, il serait très optimiste de croire que toutes les affirmations d'une théorie couronnée de succès reflètent la réalité, mais ne peut-on pas croire qu'une partie de ces affirmations est vraie ?

Il me semble que si la plupart des conceptions réalistes sont aujourd'hui des réalismes *sélectifs* et *prospectifs* c'est précisément parce qu'elles considèrent qu'il est impossible de soutenir à la fois que nos théories ont une objectivité et ne sont pas totalement mais seulement partiellement vraies. Elles en viennent ainsi naturellement à essayer de déterminer quelles parties de ces théories sont vraies et lesquelles sont accessoires.

Rappelons que notre objectif n'est pas ici de juger si ce projet est légitime ou non mais uniquement de savoir si les succès prédictifs suffisent à le mener à bout. Or, non seulement les succès prédictifs ne sont pas suffisants pour déterminer quels aspects des théories sont dignes de foi, mais ils semblent même indiquer qu'il existe une autre stratégie pour les réalistes. Celle-ci consiste à affirmer l'objectivité et la vérité partielle de nos théories tout en résistant à la tentation de dire *quelles* parties de ces théories sont vraies.

Il est par exemple classique d'avoir des résultats en mathématiques qui prouvent l'existence d'un objet sans pour autant spécifier quel est cet objet ni comment le construire. Le théorème de Bolzano-Weierstrass prouve ainsi que l'on peut extraire de toute suite réelle bornée entre m et n une sous-suite qui converge vers un x tel que $m \leq x \leq n$. Mais ni ce théorème ni sa preuve ne fournissent de méthode pour identifier ou construire cette sous-suite.

De même, si les succès prédictifs indiquent qu'il doit y avoir quelque chose de vrai dans certaines théories, on peut considérer qu'ils ne fournissent pas pour autant de procédure pour identifier ce contenu vrai. En effet, comme on l'a vu, les succès prédictifs techniques qui révèlent l'objectivité d'une théorie peuvent être dérivés de nombreuses manières et avoir de nombreuses interprétations théoriques incompatibles et différentes.

Ces succès ne peuvent donc nous donner aucune assurance que la structure ou l'aspect réel du monde, qui est l'objet de la métaphysique, est bien conforme à l'ontologie des théories scientifiques dont ils sont issus.

Pour ne pas être mal compris, distinguons les termes « métaphysique » et « ontologie » tels qu'on les entend ici. La métaphysique, en son sens traditionnel, désigne une discipline ayant pour objectif des réalités telles qu'elles existent *indépendamment* de l'expérience que nous en avons ou des hypothèses que nous faisons à leur sujet. Autrement dit, la métaphysique cherche à tenir un discours *vrai* sur le monde au sens classique de discours qui reflète la réalité de ce monde. En revanche, une ontologie ne se définit pas nécessairement par rapport à ce qui existe réellement et indépendamment de la manière dont l'esprit humain aborde la réalité. On peut parler d'ontologie pour désigner, en informatique théorique par exemple, l'ensemble des termes, concepts et relations utilisé pour décrire et structurer un ensemble de données. De même, on peut parler de l'ontologie d'une théorie physique pour désigner les relations et les concepts fondamentaux qu'utilise cette théorie pour décrire les objets physiques et leurs interactions.

Je suis conscient que cette manière de définir les termes de métaphy-

sique et d'ontologie n'est pas la seule possible et ne fait pas consensus : il arrive que l'on trouve dans la catégorie « métaphysique des sciences » des recherches visant à clarifier et à spécifier les concepts fondamentaux de théories comme la relativité générale ou la théorie de l'évolution par sélection naturelle, recherches que l'on qualifierait plutôt d'« ontologique » d'après les définitions que je viens de donner. La définition philosophique traditionnelle de l'ontologie comme science de l'être et des catégories de l'être tend d'ailleurs à faire de l'ontologie une branche de la métaphysique. Mais il me semble possible et éclairant de distinguer d'une part des recherches qui visent à expliquer et clarifier les concepts fondamentaux d'un discours sans s'engager sur la question de la vérité de ce discours (ce que je nomme ontologie) et d'autre part des recherches ayant pour ambition de montrer que ce discours est vrai ou partiellement vrai pour en tirer des connaissances sur la réalité elle-même (ce que je nomme métaphysique).

À la lumière de cette distinction, on peut ainsi reformuler la conclusion de cette partie : même si les succès prédictifs d'une théorie nous permettent d'être convaincus de l'objectivité d'une théorie, ils ne nous livrent pas de connaissance métaphysique de cette objectivité, si ce n'est qu'elle existe, parce que nous n'avons aucune assurance que l'ontologie de cette théorie soit fidèle à l'ontologie du monde réel. Les succès prédictifs sont suffisants pour soutenir un réalisme scientifique, mais un réalisme scientifique sans connaissance métaphysique.

Il n'est pas question ici de démontrer que ce réalisme sans métaphysique serait la seule ou la meilleure des conceptions réalistes légitimes : tout ce que nous avons à prouver c'est qu'il s'agit de la portée maximale que l'on puisse attribuer aux succès prédictifs. Pour reprendre la terminologie développée par A. Chakravartty dans son article « Suspension of Belief and Epistemologies of Science », ce réalisme sans métaphysique est une « attitude » (*stance*) qui accepte de parler d'objectivité des théories mais refuse les explications des succès prédictifs de ces théories qui reposent sur l'identification de certains postulats dignes de foi. Or, tout ce que l'on peut attendre d'une telle attitude est qu'elle soit rationnelle (le choix d'une attitude particulière n'étant qu'une question de valeurs

subjectives)⁶⁹. La conclusion du dernier chapitre suggère du moins que cette conception du réalisme est une position possible cohérente (et donc possible) parce qu'elle repose sur l'analyse des prédictions techniques et les rapports entre prédiction et expérimentation et ne se prononce pas sur les postulats théoriques dignes de foi, évitant ainsi les problèmes liés à l'histoire passée et future des sciences.

L'intérêt de cette attitude est qu'elle est plus modeste que les différentes formes de réalismes sélectifs et offre ainsi plus de possibilités de rapprochement avec certaines positions anti-réalistes ou neutres comme celle que Carnap développe dans les dernières pages du 26^e chapitre des *Philosophical Foundations of Physics* :

D'après moi, le conflit entre les deux approches [instrumentaliste et réaliste] est essentiellement linguistique. La question est de savoir quelle manière de parler est préférable dans une situation donnée. Dire qu'une théorie est un instrument fiable — c'est-à-dire que ses prédictions d'événements observables seront confirmées — est essentiellement la même chose que dire qu'une théorie est vraie et que les entités non observables dont elle parle existent⁷⁰.

Ainsi, pour Carnap, le réalisme et l'antiréalisme ne sont que des cadres linguistiques différents. Or, dans l'article « Empirism, Semantics and Ontology », il soutient que la question du choix d'un cadre n'est qu'une affaire de fécondité de ce cadre dans une situation donnée — c'est-à-dire une question d'ordre pragmatique⁷¹. Cette affirmation ne me semble

⁶⁹CHAKRAVARTTY, "Suspension of belief and epistemologies of science", p. 179.

⁷⁰CARNAP, *Philosophical foundations of physics*, p. 256.

⁷¹Voir Rudolf CARNAP, "Empiricism, Semantics, and Ontology", *Revue internationale de philosophie* (1950), p. 20–40. Récemment, certains métaphysiciens ont prétendu pouvoir utiliser les succès de la science empirique et des arguments d'indispensabilité pour fonder une « métaphysique néo-carnapienne ». Cet argument leur permet à la fois de critiquer ce qu'ils appellent la « métaphysique de fauteuil » — qui n'est pas instruite des connaissances scientifiques actuelles — et de se poser en héritiers de l'empirisme logique. Mais, comme on l'a vu, il n'est pas possible d'utiliser les succès prédictifs pour fonder une métaphysique scientifique. Sur ce courant de la métaphysique des sciences, voir LADYMAN et ROSS, *Every Thing Must Go*, chapitre 1, et Alyssa NEY, "Neo-positivist metaphysics", *Philosophical studies* 160.1 (2012), p. 53–78.

pas incompatible avec le réalisme sans métaphysique qui affirme seulement que dans certaines situations — dans un contexte d'intervention expérimentale — il est naturel et fécond de considérer que les variables indépendantes qui apparaissent dans les prédictions techniques ont une objectivité. L'attitude que nous avons définie ici est donc moins éloignée de l'antiréalisme que des conceptions réalistes plus fortes incompatibles avec le neutralisme de Carnap comme celle de S. Psillos⁷²

Concluons : quels succès prédictifs peuvent être des arguments en faveur du réalisme scientifique ? Les succès prédictifs techniques. Est-ce que ces succès permettent d'avoir une connaissance métaphysique de la réalité ? Non, même s'ils permettent de justifier l'intuition selon laquelle nos théories ont une objectivité, ils n'ont pas de portée métaphysique. Ces conclusions n'épuisent en rien la richesse de toutes les conceptions réalistes et anti-réalistes possibles ni toutes les dimensions du débat. Nous avons en effet étudié la notion de vérité *partielle* dans nos analyses mais pas celle de *vérité approximative* qui consiste à affirmer que l'image scientifique du monde est à une certaine distance de la réalité⁷³.

Si l'on disposait d'une mesure convaincante de la proximité à la vérité, il ne serait peut-être pas impossible de montrer que nos théories sont approximativement vraies, c'est-à-dire qu'elles se rapprochent progressivement d'une description fidèle de la réalité. Autrement dit, même si l'on n'utilise pas les succès prédictifs pour avoir une connaissance métaphysique de réalités qui existeraient indépendamment de nos théories, il n'est peut-être pas impossible de prouver qu'il existe un *progrès théorique* et ainsi aboutir à une position proche du *réalisme minimal* que décrit J. Saatsi dans ces quelques lignes :

Si nous disposions de la connaissance du monde tel qu'il est réellement, nous pourrions rendre compte des progrès empiriques entre deux théories scientifiques en termes de propriétés objectives de leur relation au monde, en jugeant si

⁷²Voir PSILLOS, *Scientific realism : How science tracks truth*, chapitre 3.

⁷³Sur cette notion, dont l'étude minutieuse déborde le cadre de cette thèse, voir notamment Ilkka NIINILUOTO, *Critical Scientific Realism*, Oxford, Oxford University Press, 1999, et CHAKRAVARTTY, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, chapitre 8.

les aspects inobservables du monde représentés par T' sont plus près de la réalité que ceux représentés par T . Ne sachant pas comment est le monde indépendamment de nos théories actuelles, on peut toujours utiliser ces théories pour rendre compte du succès empirique de nos théories passées en termes de fécondes relations inter-théoriques et espérer que l'on pourra faire de même à l'avenir.

Clairement, cette forme d'engagement réaliste minimal ne fournit pas de recette générale qui pourrait s'appliquer à une théorie actuelle donnée, par exemple le modèle standard de la physique des particules, pour spécifier quels aspects inobservables du monde nous pouvons prétendre connaître⁷⁴.

On pourrait reprocher à ce réalisme d'être trop minimal pour ne pas se confondre avec des positions comme le neutralisme de Carnap ou le néo-instrumentalisme de K. Stanford. Mais si c'était le cas, du moins pourrions nous nous réjouir d'avoir trouvé une attitude neutre et cohérente à adopter dans l'une des controverses philosophiques les plus anciennes et complexes.

⁷⁴SAATSI, "Historical Inductions, Old and New".

Conclusion générale

La place des prédictions dans l'activité scientifique

L'étude des prédictions qui s'achève ici comporte un premier résultat qui, peut-être en raison de son évidence, a rarement été relevé et commenté : *prédire est une activité spécifique des sciences empiriques*, différente d'autres pratiques comme démontrer, observer, expliquer, expérimenter, modéliser, classifier, simuler, enseigner, explorer ou concevoir de nouvelles technologies. Les sciences empiriques contemporaines n'ont ni un seul objet, ni une seule méthode, ni une seule fin qui serait de servir d'instruments pour réaliser des prédictions.

Chacune de ces pratiques pouvant être couronnée de succès, les succès prédictifs ne sont pas les seuls dont peuvent s'enorgueillir les recherches scientifiques : nous avons montré dans la première partie qu'expliquer ne se réduit pas à prédire, dans la deuxième que le développement de la cosmologie était émaillé de nombreux succès explicatifs et théoriques, dans la troisième que les tests prédictifs n'étaient pas les seuls à pouvoir confirmer des hypothèses et dans la quatrième que certaines recherches expérimentales autonomes et exploratoires pouvaient conduire à des découvertes majeures.

Et pourtant, en se concentrant exclusivement sur les prédictions, nous avons croisé dans cette thèse presque toutes les autres composantes de l'activité scientifique contemporaine — de l'analyse des données brutes aux modélisations théoriques les plus abstraites. Les prédictions occupent une place, certes spécifique, mais centrale dans les sciences empiriques ac-

tuelles, parce qu'elles sont des liens avec la majeure partie des autres dimensions de l'activité scientifique, qu'elles soient expérimentales ou théoriques.

Cette place centrale de l'activité prédictive en fait un sujet d'enquête philosophique ouvert et pluriel qui mobilise des formes d'épistémologie variées, comme l'analyse logique et conceptuelle, les études historiques, la théorie de la confirmation et les réflexions métaphysiques. Nul doute que le travail exposé dans cette thèse est loin d'avoir épuisé toutes les perspectives qu'offre ce sujet mais je vais souligner, dans cette conclusion générale, les principaux acquis de ce travail pour montrer quels prolongements ils suggèrent.

La pluralité des usages et des fonctions de l'activité prédictive

Il ne faut pas croire que l'activité prédictive occupe une place centrale dans les sciences empiriques contemporaines parce que les recherches à visée prédictive auraient un privilège logique ou méthodologique sur les autres objectifs que peuvent poursuivre ces disciplines. Il semble plutôt que si les prédictions accompagnent une grande variété de pratiques scientifiques, c'est parce qu'elles-mêmes peuvent servir de nombreux buts.

Dans cette thèse, je me suis ainsi efforcé de mettre en avant *la pluralité des usages et des fonctions de l'activité prédictive* qui ressort d'une analyse attentive des prédictions scientifiques. Prédire permet non seulement de prévoir l'évolution future de certains phénomènes (chapitre 1) mais aussi de découvrir de nouveaux phénomènes (chapitres 1, 3, 4, 5 et 6), de compléter des bases de données par interpolation ou de généraliser des résultats par extrapolation (chapitres 1 et 7), de tester des hypothèses (chapitres 6 et 7), d'orienter les programmes de recherche scientifiques (chapitres 4, 5 et 7) et de guider la conception de protocoles et de dispositifs expérimentaux (chapitre 9).

Cette pluralité des usages et fonctions n'est possible que parce qu'il existe une *grande diversité de méthodes* pour réaliser des prédictions. Dans la première partie de cette thèse, je me suis attaché à prouver que

les inférences menant à des prédictions scientifiques — ce que j’ai appelé des *raisonnements prédictifs* — peuvent prendre de nombreuses formes différentes. J’ai proposé d’ordonner cette diversité en édifiant trois modèles de la structure logique des prédictions scientifiques : les prédictions guidées par des lois, celles guidées par des modèles et celles guidées par des données. Les différences entre ces modèles impliquent que des prédictions peuvent être utilisées à presque toutes les étapes de la majeure partie des recherches scientifiques : c’est pourquoi elles peuvent apparaître dans des explications, des simulations, des expérimentations, des observations, etc.

Ces modèles n’ont pas vocation à être normatifs et à établir des *critères nécessaires* pour inclure ou exclure un raisonnement du domaine des prédictions. Étant donné que les usages et fonctions de l’activité prédictive varient à la fois synchroniquement (selon les disciplines et les objets de recherche) et diachroniquement (selon les périodes et les techniques disponibles), la notion de prédiction est un concept à texture ouverte. Il est donc impossible de fournir plus qu’un ensemble de *caractéristiques suffisantes* pour circonscrire les recherches empiriques actuellement considérées comme prédictives. Les trois modèles logiques de prédictions que j’ai exposés sont des idéaux-types qui définissent de telles caractéristiques suffisantes.

L’intérêt de cette typologie des raisonnements prédictifs n’est pas seulement d’expliquer la place des prédictions dans l’activité des sciences contemporaines. Elle permet de soutenir que, *contrairement à une idée répandue, il n’y a pas lieu de distinguer des disciplines ou théories en elles-mêmes prédictives et des sciences qui seraient incapables de réaliser des prédictions en raison de leur objet ou de leur méthode*. Nous avons vu dans le chapitre 1 (section 1.3.4) comment adapter une expérience de pensée de S. Ruphy pour prouver que la prédictibilité ou l’imprédictibilité d’un phénomène dépend essentiellement des attentes des chercheurs et des objectifs qu’ils fixent à leurs recherches. Et dans le chapitre 2 j’ai tâché de prouver que la thèse selon laquelle certaines sciences comme la biologie évolutive ou la géomorphologie ne peuvent fournir que des explications et non des prédictions est un préjugé qui repose sur un pri-

vilège injustifié donné aux prédictions guidées par des lois aux dépens des prédictions guidées par des modèles ou par des données.

Nous avons ainsi vu qu'il n'existe pas de discipline ou de théorie auxquelles on pourrait dénier *a priori* tout *pouvoir prédictif*, c'est-à-dire toute capacité à réaliser des prédictions. Mais, dans le cadre de cette thèse, j'ai fait le choix d'entrer dans le détail du développement historique de la *capacité prédictive* que d'une seule science, la cosmologie⁷⁵, parce que les caractéristiques de cette discipline rendent la question du rôle des prédictions particulièrement saillante⁷⁶. Il serait nécessaire et fécond d'étudier le rôle des prédictions dans ces disciplines comme la biologie évolutive où les prédictions guidées par des lois jouent un rôle moins important que dans les sciences physiques. Les résultats que nous avons obtenus en analysant la notion de capacité prédictive montrent que celle-ci s'accroît lorsque plusieurs théories tissent de nouveaux liens : on pourrait ainsi étudier comment des épisodes comme la synthèse moderne en biologie se sont accompagnées d'une augmentation de la capacité prédictive des différentes théories qui y ont été impliquées.

Si mon ambition était l'exhaustivité, il me resterait aussi à considérer le pouvoir prédictif et la capacité prédictive des sciences humaines et sociales comme la sociologie ou l'économie. Ces disciplines constituent un continent entier des sciences empiriques que j'ai passé sous silence dans cette thèse, parce qu'elles posent des problèmes d'ordre méthodologique, social et politique qui leur sont propres. Le cadre de cette thèse ne permettait pas le traitement sérieux de ces problématiques, traitement nécessaire si l'on ne veut pas réduire ces disciplines aux sciences physiques ou biologiques de manière simpliste.

Cependant, certaines sciences sociales comme la démographie, la criminologie ou l'économie manipulent aujourd'hui des données massives (des *Big Data*) avec l'objectif affiché d'améliorer leur capacité prédictive. L'analyse des prédictions tirées de telles données massives que j'ai proposée dans le chapitre 2 fournit un aperçu des enjeux épistémologiques que rencontrent ces disciplines. Nous avons notamment vu que si l'augmenta-

⁷⁵Sur la différence entre pouvoir prédictif et capacité prédictive, voir introduction et chapitre 4, section 4.1.3

⁷⁶Voir introduction.

tion de données variées permet d'améliorer significativement la précision de modèles prédictifs complexes et détaillés, ces modèles sont restreints à des cas d'interpolation et sont sensibles aux problèmes d'ajustement forcé aux données. Ils ne sont donc pas adaptés si l'on recherche des prédictions *robustes*, c'est-à-dire qui décrivent le comportement général d'un grand nombre de systèmes aux conditions initiales différentes. L'émergence des prédictions dérivées de données massives en économie ou en démographie n'élimine donc pas la nécessité de recourir à des modèles prédictifs plus simples, voire idéalisés, mais plus adaptés à de grandes échelles de temps et de population.

Le problème de la portée des succès prédictifs

La pluralité des fonctions et des méthodes prédictives ouvre le problème de déterminer en quoi consistent les succès prédictifs et quel est leur portée. Est-ce qu'il suffit qu'une prédiction soit dérivée d'une loi, d'un modèle ou de données pour que cela représente un succès? Faut-il en outre que cette prédiction soit testable par des observations et des mesures? Est-ce qu'une prédiction guidée par des données est en mesure de confirmer un modèle ou une théorie?

Pour aborder ces questions, j'ai examiné successivement trois affirmations qui attribuent chacune une portée plus étendue aux prédictions réussies :

- Les succès prédictifs ont une influence majeure sur les scientifiques et l'évolution des connaissances scientifiques (partie 2).
- Les prédictions réussies sont des preuves déterminantes pour choisir rationnellement des hypothèses (partie 3).
- Les succès prédictifs nous assurent que certaines théories sont vraies ou partiellement vraies (partie 4).

La fécondité et l'influence des succès prédictifs sur l'évolution des sciences

Pour étudier l'influence des prédictions dans les transformations qu'a connues une discipline scientifique, j'ai choisi d'étudier, dans la deuxième partie, l'histoire de la cosmologie scientifique de 1917 à nos jours. Cette discipline a connu des succès prédictifs impressionnants, dont l'un des exemples les plus saisissants est la prédiction, par la théorie du big bang, que l'Univers émet un rayonnement de corps noir. Cette prédiction est impressionnante non seulement parce qu'elle fut confirmée avec une extraordinaire précision par le satellite COBE en 1989 (voir figure 9.5), mais aussi parce qu'il s'agissait d'une prédiction risquée : elle n'avait que peu de chance de s'avérer correcte si la théorie du big bang était fausse.

Et pourtant, l'histoire des prédictions en cosmologie montre que ce succès prédictif n'a pas joué de rôle majeur dans l'acceptation de la théorie du big bang qui a eu lieu une vingtaine d'années avant le lancement de COBE. L'adoption de cette théorie a résulté d'une combinaison de succès non prédictifs (comme l'explication des abondances des éléments chimiques dans l'Univers) et prédictifs (comme la prédiction de la température du ciel) qui se sont accumulés entre les années 1940 et 1960. Les prédictions réussies ne semblent donc pas les seuls succès à avoir du poids dans l'évolution des sciences et les succès prédictifs isolés, si impressionnants soient-ils, jouent rarement un rôle décisif dans le rejet ou l'acceptation de nouvelles idées et connaissances scientifiques. Les prédictions prennent place dans un contexte composé de connaissances empiriques et théoriques qui leur donne ou non le statut de succès prédictif.

Cependant, si l'on étudie l'évolution d'une science comme la cosmologie sur le temps long, on observe que certaines prédictions réussies ont joué un rôle majeur dans ses transformations parce que leur dérivation a servi de modèle à d'autres prédictions et qu'elles ont ainsi ouvert la voie à de nouvelles recherches. La prédiction de l'expansion de l'Univers par Lemaître, celle de la température du ciel par Alpher et Hermann ou celle de l'invariance d'échelle des anisotropies du fond diffus cosmologique par les théories de l'inflation ont ainsi été à l'origine de nouvelles séries de

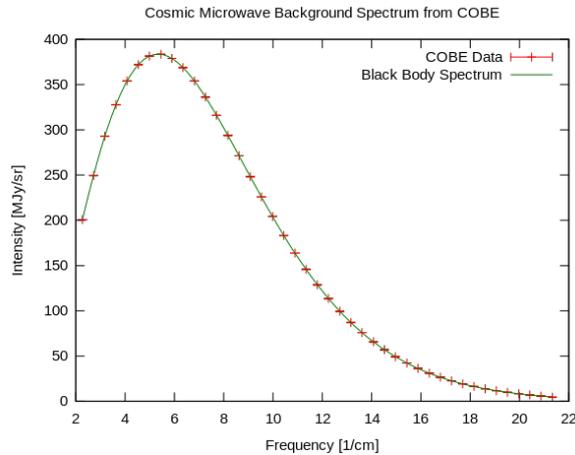


FIGURE 9.5 : Graphe montrant l'intensité du fond diffus cosmologique en fonction de la fréquence. Ces données récoltées par l'instrument FIRAS du satellite COBE sont si précises que les barres d'erreurs indiquées par des crochets sur ce graphique ont dû être multipliées par cinquante pour être visibles. Ces données suivent exactement la courbe théorique du corps noir prédite par la théorie du big bang. Source : NASA.

prédictions et ont contribué au développement progressif de la capacité prédictive de la science cosmologique.

J'ai appelé ces prédictions *fécondes* parce qu'elles ont pour trait commun d'avoir témoigné, aux yeux des scientifiques, de la *fécondité* d'une hypothèse, d'un modèle ou d'une théorie. Leur dérivation, encore plus que leur résultat, laissait en effet envisager que l'hypothèse, théorie ou modèle dont elles sont dérivées avait la capacité de mener à de nouvelles prédictions dans l'avenir. La prédiction de la température du ciel, par exemple, reposait sur le calcul des réactions nucléaires de l'Univers primordial et ouvrait ainsi la perspective d'appliquer la physique des particules à la cosmologie pour en tirer de nombreuses nouvelles prédictions vérifiables par des observations.

Le principal résultat de l'étude historique de la portée des prédictions que j'ai proposée est donc que *c'est parce qu'une prédiction ouvre la voie à de nouveaux développements qu'elle représente un succès capable d'influencer l'évolution d'une science.*

Le rôle et la valeur des tests prédictifs

Reste à savoir si cette influence des prédictions fécondes est strictement de l'ordre de l'impression psychologique ou si les choix qui en découlent peuvent être rationnels. Dans la troisième partie de cette thèse nous avons examiné si la portée des succès prédictifs va jusqu'à permettre de légitimement considérer les tests prédictifs comme des preuves d'hypothèses.

En dépit de l'idée intuitive selon laquelle une hypothèse devrait être plus confirmée par un phénomène surprenant qu'elle prédit que par un phénomène déjà connu ou utilisé dans sa formulation, il est difficile de trouver le rôle que peuvent jouer les prédictions dans la relation de confirmation d'une hypothèse par des données. Cette relation ne devrait en effet impliquer qu'une preuve, une hypothèse et leurs relations *logiques*. Or le fait que des données soient prédites lorsqu'elles sont observées après la formulation d'une hypothèse est une relation de type *chronologique* et non logique entre données et hypothèse. De même, le fait que des données soient prédites parce qu'elles n'ont pas servi à la formulation de cette hypothèse, ou parce qu'aucune autre hypothèse ne peut en rendre compte, concerne le contexte historique dans lequel elle a été formulée et non sa relation logique aux données.

Enfin, si l'on considère que seuls les phénomènes inconnus ou surprenants ont valeur de preuve, alors comment rendre compte de tous les cas où des hypothèses ont été confirmées par des données déjà connues, comme la relativité générale qui fut confirmée en 1915 par l'avancée du périhélie de Mercure connue depuis le XIX^e siècle ?

Nous avons vu dans le chapitre 6 que ces problèmes, que l'on a appelés *problème de Keynes* et *problème des données déjà connues*, se conjuguent à d'autres difficultés et montrent qu'il est moins aisé qu'il n'y paraît de concilier les choix d'hypothèses que l'on observe dans l'histoire des sciences — sur lesquels les prédictions semblent avoir une influence — avec les théories de la confirmation fondées sur l'analyse logique des relations entre données et hypothèses — où il ne semble pas y avoir de raison *a priori* de prendre en compte le fait qu'une donnée soit prédite ou non.

Si l'on s'arrête là, les prédictions apparaissent plus comme des guides

pour construire des hypothèses que comme des tests rigoureux pour les confirmer ou les infirmer. En testant les prédictions d'une hypothèse, une scientifique peut s'assurer que cette hypothèse n'est ni trop complexe ni trop imprécise, mais le test prédictif n'est ni nécessaire ni suffisant pour justifier son choix.

Les succès prédictifs n'auraient-ils alors aucune valeur de preuve ? Leur portée se limiterait-elle à frapper l'imagination des scientifiques et à les aider dans la formulation de leurs hypothèses ?

J'ai discuté en détail dans les chapitres 6 et 7 les solutions qui ont été proposées pour donner une place aux tests prédictifs dans le choix des hypothèses. J'ai argumenté que c'est précisément parce que les succès prédictifs offrent la possibilité aux scientifiques de contrôler si leurs hypothèses, théories ou modèles ont été formulés sans biais ni tricherie qu'ils ont un rôle à jouer dans la confirmation des hypothèses.

La relation de confirmation peut en effet être envisagée, comme le suggère Lipton, sous l'angle des vertus que doivent posséder des hypothèses (leur simplicité, leur plausibilité, leur compatibilité avec d'autres hypothèses) et des données (leur variété, leur précision, leur fiabilité, leur bruit) pour que les premières soient confirmées par les secondes. Dans le cadre de cette théorie des vertus épistémiques, les succès prédictifs ont un rôle de témoin : ils indiquent qu'une vertu théorique comme la simplicité n'a pas été sacrifiée aux dépens d'une vertu empirique, la diversité des preuves par exemple.

En effet, si une hypothèse a été ajustée de manière forcée, c'est-à-dire complexifiée pour coller aux idiosyncrasies de l'ensemble de données qui a servi à sa formulation, alors elle n'a que peu de probabilité de réussir un test consistant à prédire de nouvelles données. *A contrario*, une hypothèse qui réussit un test prédictif n'a sacrifié ni sa simplicité ni la plausibilité de ses hypothèses auxiliaires, sans quoi elle aurait été si impraticable que l'on n'aurait pu l'appliquer à d'autres phénomènes. C'est ainsi que la théorie de l'état stationnaire en cosmologie a cédé le pas devant la théorie du big bang dans les années 1960, parce que cette dernière pouvait prédire de nombreux phénomènes comme l'abondance d'Hélium dans l'Univers ou l'existence d'un fond diffus cosmologique sans

avoir recours à des hypothèses auxiliaires peu plausibles qui gênaient son application à de nouveaux cas.

Je me suis ainsi employé dans le chapitre 7 à montrer que les tests prédictifs d'hypothèses servent à révéler que certaines vertus épistémiques n'ont pas été sacrifiées dans la formulation de ces hypothèses à partir d'un ensemble de données déjà connues. Or, ces vertus ne sont pas manifestes mais souvent opaques et soumises à débat. En outre le sacrifice de l'une d'entre elles rend une hypothèse difficilement utilisable et applicable à de nouveaux phénomènes. Les tests prédictifs sont donc précieux pour évaluer concrètement quelles hypothèses ont un avenir devant elles et quelles hypothèses risquent au contraire de rester à la traîne des faits.

La conclusion de l'analyse proposée dans la troisième partie est que *les prédictions qui jouent un rôle dans le choix des hypothèses sont celles qui indiquent les vertus de ces hypothèses et qui révèlent que rien n'empêche leur capacité prédictive de s'accroître*. Il me semble que cette conclusion prouve que la confiance des cosmologistes envers les prédictions qui témoignent de la *fécondité* des hypothèses et théories n'était pas due qu'à une prédilection irrationnelle pour les prédictions mais était fondée et légitime.

Cette conception de la confirmation fondée sur l'analyse des vertus épistémiques fait face à de sérieuses difficultés, comme la question de savoir si l'opacité de ces vertus et de leurs relations ne la rend pas triviale. Mais elle semble un projet philosophique fécond et fait actuellement l'objet d'efforts pour être clarifiée et systématisée⁷⁷.

On a vu qu'il était possible de l'utiliser pour caractériser la notion (fréquemment employée mais rarement définie) de fécondité comme un équilibre entre vertus théoriques et vertus empiriques permettant la croissance de la capacité prédictive d'une théorie. Elle permet aussi de relier la question des critères de sélection des théories déjà abordée par Kuhn⁷⁸ à celle de la construction des modèles dans les sciences du vivant qui se pose en des termes similaires⁷⁹. Cette connexion ouvre la perspec-

⁷⁷Voir Michael KEAS, "Systematizing the theoretical virtues", *Synthese* (2017), publication en ligne.

⁷⁸KUHN, "Objectivité, jugement de valeur et choix d'une théorie".

⁷⁹Voir LEVINS, "The strategy of model building in population biology" et WEIS-

tive d'étendre les conclusions que j'ai tirées de l'histoire de la cosmologie à d'autres sciences en examinant avec attention comment le poids de chaque vertu varie d'une discipline à l'autre.

Enfin, en ne séparant pas radicalement la question de la vérification des hypothèses de celle de leur formulation, l'analyse des vertus épistémiques semble aussi pouvoir s'appliquer aisément à des problèmes concrets de méthodologie scientifique. Les résultats que j'ai avancés dans cette thèse suggèrent notamment que l'importance et la caractérisation de la simplicité varie selon le contexte et les objectifs qui guident la formulation d'une hypothèse et qu'il est donc essentiel d'utiliser des tests statistiques adaptés à ce contexte et à ces objectifs. On espère ainsi contribuer à une théorie philosophique de la confirmation qui ne soit pas que descriptive et normative mais aussi pragmatique, au sens où elle pourrait aider les chercheuses à résoudre les difficultés auxquelles elles sont concrètement confrontées dans leurs recherches.

La portée des succès prédictifs et ses limites

On peut désormais apporter une réponse à la première des trois questions que nous avons posées en introduction : *en quoi consistent les succès prédictifs des sciences empiriques ?*

Les succès prédictifs sont des prédictions confirmées empiriquement qui manifestent certaines vertus de la théorie dont elles sont tirées et qui permettent de s'assurer que rien n'empêche la capacité prédictive de cette théorie de croître.

Par conséquent, on peut répondre à la deuxième question qui fait l'objet de cette thèse : *comment les succès prédictifs sont-ils obtenus ?*

Tout raisonnement prédictif ne peut aboutir à une prédiction féconde. Dans les chapitres 5 et 7 je me suis efforcé de montrer que les prédictions qui ont joué un rôle dans l'évolution de la cosmologie et dans le choix des hypothèses sont des prédictions guidées par des lois ou par des modèles, c'est-à-dire des prédictions qui ne visent pas directement à prévoir l'avenir ou à décrire des phénomènes inconnus mais à rendre compte

BERG, "Forty years of "The strategy" : Levins on model building and idealization".

du comportement général d'un grand nombre de phénomènes de genres différents.

Les structures de ces prédictions ont deux caractéristiques fondamentales en commun :

- Elles utilisent des conditions aux limites et des hypothèses auxiliaires souvent *simplifiées* et/ou *idéalisées*.
- Elles sont *robustes* et donc *sous-déterminées*, c'est-à-dire que leur résultat peut être dérivé à partir d'autres ensembles d'hypothèses et de conditions initiales.

En raison de ces deux caractéristiques, il est plus complexe de répondre à la troisième question posée en introduction : *quelle est la portée des succès prédictifs et jusqu'où pouvons-nous accorder notre confiance à une pratique ou une théorie scientifique qui peut s'enorgueillir de tels succès ?*

Les résultats des trois premières parties de cette thèse que nous avons détaillés dans cette conclusion sont essentiellement *positifs* : ils montrent que les succès prédictifs qui ont une influence majeure sur l'évolution historique des connaissances scientifiques sont aussi des preuves déterminantes pour choisir rationnellement les hypothèses. On peut donc leur attribuer une portée en histoire des sciences et en théorie de la confirmation. Mais il est plus délicat d'étendre la portée de ces mêmes succès prédictifs à la métaphysique des sciences et de considérer qu'ils nous indiquent quelles théories sont vraies ou partiellement vraies.

En effet, puisque les succès prédictifs sont obtenus à partir de prédictions qui mobilisent des hypothèses auxiliaires simplifiées et idéalisées d'une part et sous-déterminées d'autre part, on bute sur plusieurs problèmes lorsque l'on cherche à fonder sur ces succès l'argument du miracle qui est l'argument le plus souvent mis en avant pour soutenir le réalisme scientifique.

Ces problèmes, que l'on a détaillés dans le chapitre 8, constituent les principaux *résultats critiques* de cette thèse et découlent de la même source : les prédictions qui guident les scientifiques dans leurs choix théoriques ne semblent pas pouvoir être interprétées comme littéralement

vraies. Autrement dit, *les succès prédictifs qui confirment une théorie ne sont pas forcément adaptés à l'argument du miracle.*

Les réalistes ont par exemple le dilemme suivant lorsqu'elles cherchent à déterminer quels succès prédictifs sont suffisants pour considérer une théorie comme *mature*, c'est-à-dire digne de foi : elles veulent des succès capables de confirmer ces théories mais désirent aussi que ces succès impliquent le moins possible d'idéalisations n'ayant pas de sens physique. Or les prédictions qui jouent un rôle dans la confirmation d'une théorie sont précisément celles qui utilisent dans leurs dérivations de telles hypothèses idéalisées. La possibilité de la désidéalisation de ces hypothèses reste ouverte, mais le *dilemme des réalistes* que je me suis efforcé d'exposer montre qu'il est crucial de traiter la question du rôle prédictif des idéalisations et des fictions pour toute argumentation réaliste fondée sur les succès prédictifs.

En outre, la plupart des réalistes soutiennent aujourd'hui un réalisme sélectif qui n'attribue qu'une *vérité partielle* aux théories couronnées de succès, c'est-à-dire qui considère que seule une certaine partie du contenu informatif des théories présentes et passées reflète la réalité. La procédure classique pour identifier les postulats des théories qui sont dignes de foi consiste à ne retenir que ceux qui sont déployés dans les succès prédictifs des théories, c'est-à-dire ceux qui sont indispensables pour réaliser les prédictions qui font le succès de ces théories.

Mais cette stratégie réaliste est elle aussi confrontée à un problème qui vient de la structure des succès prédictifs. Ceux-ci sont souvent *sous-déterminés*, c'est-à-dire peuvent être obtenus par différentes dérivations qui n'utilisent pas les mêmes hypothèses théoriques. Nous avons vu ainsi dans le chapitre 8 que la prédiction de l'existence d'un point lumineux dans l'ombre d'un écran circulaire pouvait être dérivée soit à partir des intégrales de Fresnel, soit à partir d'un modèle géométrique représentant la propagation des ondes lumineuses dans l'éther. Il est dès lors difficile de prouver avec certitude que certains postulats théoriques comme les intégrales de Fresnel sont absolument indispensables pour engendrer un succès prédictif.

Cela semble même impossible lorsque l'on essaye d'identifier les vrais

aspects de théories actuelles et non plus des siècles passés. Le fait qu'un postulat nous *apparaisse* aujourd'hui indispensable pour obtenir un succès prédictif ne semble pas une raison suffisante pour croire qu'il l'est réellement et qu'il constitue une déclaration vraie et définitive sur la réalité. C'est pourquoi j'ai soutenu que les réalistes qui étudient les prédictions scientifiques doivent prendre garde à ne pas faire eux-mêmes de prédictions téméraires à propos de l'avenir de la science en déclarant que l'on pourrait circonscrire l'ensemble des postulats vrais et définitifs de nos théories actuelles qui survivront aux prochaines révolutions scientifiques.

Les arguments que j'ai proposés et les difficultés que j'ai soulevées doivent sûrement être soumis à un examen plus détaillé que celui que l'on a pu faire dans cette thèse. Ils demandent notamment à être mieux documentés par l'histoire des sciences et les pratiques scientifiques contemporaines pour déterminer, d'une part, dans quelles conditions il est impossible de désidéaler des hypothèses et, d'autre part, si les cas de sous-détermination prédictive sont suffisamment répandus pour représenter un défi substantiel au réalisme scientifique. Mais ces arguments illustrent, selon moi, tout l'intérêt qu'a le débat sur les nouvelles prédictions pour une controverse aussi vaste, complexe et ancienne que celle qui oppose réalistes et anti-réalistes.

En effet, le débat sur les nouvelles prédictions apporte une dimension empirique à cette controverse qui est en grande partie métaphysique, ce qui permet de la renouveler et de tester les arguments qui s'y affrontent. Il serait ainsi éclairant d'analyser le réalisme sélectif sur le temps long de l'histoire des sciences pour voir comment les succès prédictifs des théories passées sont retenus au cours de plusieurs révolutions scientifiques et si les succès des théories passées sont toujours expliqués de la même manière par les théories ultérieures.

Les applications techniques des prédictions et la question de l'objectivité

Si l'argument du miracle fondé sur les succès prédictifs rencontre de sérieuses difficultés, est-il complètement injustifié de croire que les théories,

modèles et hypothèses qui ont réussi à faire des prédictions précises et surprenantes n'ont aucune objectivité ?

Si l'on appelle « objectif » ce qui ne relève pas des goûts singuliers de chacun, l'affaire est entendue : les succès prédictifs sont objectifs parce qu'ils ont la capacité de créer un accord intersubjectif sur les vertus épistémiques des théories dont ils sont dérivés. Mais si l'on prend le terme « objectif » comme l'opposé de ce qui n'existe que pour nous et qui dépend de la perception ou la conception que l'on en a, il est plus difficile d'argumenter que les succès prédictifs révèlent l'objectivité des théories scientifiques.

En effet, qualifier la découverte ou l'observation d'un phénomène de *succès prédictif* suppose que l'on puisse l'interpréter théoriquement pour montrer qu'elle dérive d'une théorie donnée. La découverte que la température du ciel est de $5K$ par Penzias et Wilson en 1965 n'aurait jamais été considérée comme un succès prédictif de la théorie du big bang si Dicke et J. Peebles n'avaient pas interprété ce résultat comme un rayonnement fossile provenant de la nucléosynthèse primordiale. Dire que l'on observe le rayonnement fossile de l'Univers primordial dépend donc de la conception théorique que l'on a de l'Univers. Autrement dit, ce qui est prédit et le fait que cela soit prédit dépend d'une interprétation théorique. Cette interprétation du résultat d'une prédiction variant selon la représentation théorique que l'on s'en fait, elle n'est pas indépendante de nos perceptions ou de nos conceptions et ne semble pas pouvoir être considérée comme objective.

Mais cette conception de l'objectivité et des succès prédictifs semble oublier que l'on juge avant tout de l'existence des objets en *interagissant* avec eux et non en se les représentant. C'est le fondement des épistémologies réalistes comme celles de I. Hacking et d'A. Chakravartty qui argumentent que les manipulations et interactions d'entités postulées par les théories scientifiques sont la meilleure preuve de leur existence.

Dans le chapitre 9, je me suis efforcé de montrer que ces philosophies réalistes supposent de définir un type spécifique de succès prédictifs si elles veulent expliquer comment les théories scientifiques peuvent avoir des applications expérimentales nous permettant d'interagir avec la réa-

lité. Ces succès, je les ai appelés des *succès prédictifs techniques*.

En effet, l'une des dimensions principales des prédictions est qu'elles permettent d'interagir avec le monde en construisant des dispositifs techniques fiables et efficaces. Le succès de la mécanique classique ne consiste pas qu'à prédire la date des éclipses et la force des marées : c'est aussi de prédire quel poids peut supporter un pont ou quelle énergie est nécessaire pour envoyer une masse donnée en orbite. Ainsi, dans le contexte des sciences expérimentales, les succès prédictifs sont ceux qui permettent de construire des dispositifs capables de produire et d'intervenir sur de nouveaux phénomènes.

Je me suis employé à trouver les conditions pour qu'une prédiction puisse être un succès technique. J'ai conclu qu'une prédiction peut être qualifiée de technique non pas en raison de sa dérivation à partir d'une théorie mais en raison de la forme logique de son énoncé. *Si une prédiction peut être exprimée sous la forme d'une implication dont l'antécédent ne contient que des variables indépendantes (c'est-à-dire qui peuvent être modifiées et mesurées directement par l'expérimentateur), alors elle peut guider la conception de dispositifs expérimentaux.*

C'est *via* ces prédictions techniques que les théories, modèles et hypothèses scientifiques trouvent des applications expérimentales, nous permettent d'interagir avec la réalité et manifestent leur objectivité. Certes, l'objet sur lequel on expérimente ou que l'on détecte peut être mal identifié. Mais comment ne pas croire que les variables *indépendantes* sur lesquelles on intervient pour interagir avec cet objet ne sont pas corrélées à des variables (dites *dépendantes*) qui existent réellement et qui sont elles-mêmes corrélées à cet objet ? On peut ne pas être certain de la nature de cette corrélation (causale ou non causale) ni de la véritable nature de ces variables dépendantes, mais on sait qu'elles existent et que nos théories ont une objectivité.

Peut-être ne peut-on aller au-delà de cette affirmation et il me semble qu'il est téméraire de vouloir étoffer cette objectivité en détaillant la nature de ces variables. Si l'on cherche à prouver que ces variables correspondent à la description que nos théories nous donnent de certaines propriétés et entités, on risque fort de retrouver les problèmes du réa-

lisme sélectif détaillés plus haut. C'est pourquoi j'ai essayé de prouver, à la fin de la quatrième partie, qu'il était cohérent de se contenter d'affirmer que les succès prédictifs montrent que nos théories sont partiellement vraies sans tenter d'identifier quelles parties de la description théorique du monde contenue dans ces théories sont effectivement vraies.

Ce réalisme si minimal qu'il ne comprend presque aucune connaissance métaphysique est une position qu'il serait nécessaire d'élaborer plus en détail. Une des principales questions est de déterminer si cette position est authentiquement réaliste ou si elle se confond avec des positions neutres comme celle de Carnap ou anti-réalistes comme celle de K. Stanford.

Une autre perspective intéressante sur laquelle ouvre la notion de succès prédictif technique est d'examiner si la notion de *vérité* ne change pas de signification lorsque l'on étudie la science contemporaine sous l'angle de ses applications expérimentales et technologiques. C'est ce que semble suggérer Bertrand Russell (1872-1970) dans ce passage de *Science et religion* :

La science nous incite donc à abandonner la recherche de la vérité absolue, et à y substituer ce que l'on peut appeler la vérité « technique », qui est le propre de toute théorie permettant de faire des inventions ou de prévoir l'avenir. La vérité « technique » est une affaire de degré : une théorie est d'autant plus vraie qu'elle donne naissance à un plus grand nombre d'inventions utiles et de prédictions exactes. La « connaissance » cesse donc d'être un miroir mental de l'univers, pour devenir un instrument à manipuler la matière⁸⁰.

Une telle définition de la vérité qui repose sur ses effets — et que l'on pourrait ainsi qualifier de *pragmatique* — ne diminue en rien les succès des sciences contemporaines. Au contraire, comme l'ont montré David Valls-Gabaud et Alexander Boksenberg⁸¹, reconnaître la capacité d'invention

⁸⁰Bertrand RUSSELL, *Science et religion*, trad. par Philippe-Roger MANTOUX, Paris, Gallimard, 1935, p. 13.

⁸¹David VALLS-GABAUD et Alexander BOKSENBERG, "The Role of astronomy in society and culture", *Proceedings of the International Astronomical Union* 5.260 (2009), p. 4-8.

des sciences contemporaines comme l'astronomie, c'est leur reconnaître un rôle social et culturel qui ne diminue en rien leur scientificité. Au contraire, ce rôle montre leur capacité à révolutionner les modes de vie et les visions du monde et prouve ainsi leur valeur.

L'analyse des succès prédictifs et de leur portée que nous avons proposées dans cette thèse plaide en faveur de cette substitution d'une définition pragmatique de la vérité à une définition comme correspondance à la réalité. Mais il reste à savoir si une telle définition pragmatiste est compatible avec le réalisme scientifique.

Dans tous les cas, ces recherches sur les succès prédictifs techniques m'apparaissent comme un domaine fertile pour poursuivre l'analyse de l'activité prédictive. En approfondissant les liens qui existent entre les pratiques prédictives et les différentes formes d'expérimentations scientifiques, nous pouvons explorer les contacts entre théorie et expérience au cœur des sciences empiriques et faire nôtre la maxime de Bachelard :

Ainsi nous serons toujours ramenés au centre philosophique où se fondent à la fois l'expérience réfléchie et l'invention rationnelle, bref dans la région où travaille la science contemporaine⁸².

⁸²BACHELARD, *Le Rationalisme appliqué*, p. 20.

Cinquième partie

Annexes

English summary of the dissertation

Introduction

The main topic of this dissertation is predictive activity. I begin by sketching a voluntarily loose definition of scientific predictions in order to distinguish them from non-scientific predictions such as divination or prophecies. A prediction is the conclusion of a predictive reasoning or predictive argument which is *a series of inference fixing the value of one or several variable(s) without the help of measurement or observation*. If this reasoning is publicly verifiable, then its result is eligible to be a scientific prediction. Otherwise, it cannot be but a non-scientific prediction.

Empirical sciences are a cluster of disciplines using experiments and observations to test theoretical assertions. Thus, predictions in empirical sciences can be tested: if the predicted value of a variable fits its measured or observed value, then it is considered as a successful prediction. Predictive successes seem to be more palpable than other kind of scientific successes. Criteria of explanatory successes for example vary over time and are relative to the discipline under consideration. What counted as a good explanation for an astronomer of the 15th century — combining perfectly circular and uniform movement in order to account for celestial phenomena — is different from what is considered as a satisfying explanation by a chemist of the 18th century — decomposing a given substance into chemical elements. Empirically confirmed predictions, on the other hand, seem to be unquestionable and clearly identifiable successes that have been for a long time accepted as the benchmark of successful hy-

potheses across all sciences⁸³.

This has led many scientists and philosophers of science to attribute important consequences to predictive successes. Successful predictions are said to impact the course of the history of sciences by showing the superiority of new theoretical frameworks over older ones. Successes such as the prediction of the return of Halley's comet, of the existence of a bright spot at the center of a circular shadow or of the existence of unknown chemical elements, are often summoned to prove the value of a given theory or of science as a whole.

Yet, this influence could be purely psychological and irrational. Successful predictions could strike our imagination without having any justifiable role in the choice of hypotheses. However, *predictivists* maintain that it is rational to give more weight to predicted evidence than to accommodated ones. In their eyes, predictive successes play a legitimate role in theory-choice.

Moreover, most of present-day *realists* consider that theories enjoying genuine predictive successes are true or approximately true. Their argument is that this kind of success cannot be fudged. It would be a "miracle" or a "cosmic coincidence" if successful predictions were derived from false theories. *Selective realists*, who claim that theories are only partially true, also use predictions to distinguish between *idle* and *working* posits of past theories. The former are dispensable hypotheses deployed in no predictive success of a theory, while the latter are worthy of belief and retained through scientific change because they are indispensable to generate successful *novel prediction*. In that respect, predictive successes are not only criteria of theory-choice: they reveal which parts of our scientific image can be literally construed as true.

In a nutshell, three claims can be made regarding scientific successes: one may merely claim that they influence theory change, one may add that this influence is legitimate because predicted data are strong evidence in favour of an hypothesis, and one may even go as far as claiming that predictive successes are the trademark of true hypotheses. This dis-

⁸³See for example Aristotle's *Politics* [1259a] where the value of Thales' astronomical knowledge is proved by its ability to forecast the weather.

sertation investigates the scope of predictive success by examining each of this claim.

The scope of predictive success is not unambiguous because the structure of predictive reasoning is a puzzling one. Deriving prediction implies the use of boundary conditions that are often simplified or idealised hypotheses. At first glance, these hypotheses do not seem to be literally interpretable as true. How correct predictions can be derived from false assumptions? Moreover, all successful predictions are not recognised as genuine predictive successes. If it does not seem sufficient for a predicted result to fit empirical data to be considered as predictive successes, which kinds of predictions are able to confirm or refute an hypotheses? It is not even obvious that predictions should be derived from hypotheses or theories. Some predicted results just follow from the interpolation or extrapolation of data. In this case, is it even possible to consider that the success of a prediction can be attributed to an hypothesis or a theory?

This dissertation aims at clarifying the scope of predictive success by analysing the predictive activity of empirical sciences. In the first part (chapter 1 and 2), I investigate the different kinds of predictive arguments and claim that predictive successes come in many forms and structures. That is why it is a non trivial problem to know which predictive successes play a role in scientific change, in theory choice and in scientific realism.

In the second part (chapter 3, 4 and 5), I study the impact of successful predictions in the history of modern cosmology since 1917. I argue that scientists value predictions attesting possible improvement in the predictive capacity of new hypotheses.

In the third part (chapter 6 and 7), I examine various issues in theory of confirmation if one tries to attribute an evidential value to predicted evidence. I develop the framework of theoretical and empirical virtues in order to defend a predictivist thesis. Predictions are valuable tests of hypotheses in as much as they are proxy for one of the most important theoretical virtues : fruitfulness. I show that this result converges with the lessons from history of science: it is the development of predictive capacity and not predictions themselves which play a role in theory choice.

The last part of the dissertation (chapter 8 and 9) sketches a realist position based on predictive successes. I argue that predictive successes cannot be used in selective realists' strategies to circumscribe which theoretical hypotheses are worthy of belief. However, I claim that they do play a role in experimental arguments in favour of realism.

Part 1 : the structure of scientific predictions

Since the 1940s, models of scientific explanations have flourished. Scientific predictions, on the other hand, has raised much less philosophical interest⁸⁴. As a result, predictions are often confused with forecasts of future events or consequences of theoretical hypotheses.

The first part of this dissertation examines the structure of predictive arguments in the same way models of explanations have been discussed. In chapter 1, I show that the diversity of predictive practices cannot be captured by traditional covering law models. Chapter 2 aims at proving that sciences such as evolutionary biology — which are often said to have no predictive power — have developed specific methods of predictions based on model building and data mining.

Chapter 1: law-driven predictions and covering law models

In chapter 1, I study the most well-known and perhaps only philosophical models for scientific prediction: Hempel's covering law models. These models depict prediction and explanation as having the same logical structure: both are the deduction or the induction of a sentence from (deterministic or statistical) law(s). If the sentence refers to a future event, then the argument is a prediction. Otherwise (if the statement refers to a past event or enunciates a law), it is an explanation.

Covering law models have been intensively discussed, but only in the perspective of finding better conceptions of explanation. Very few objec-

⁸⁴For an history of the philosophical divorce between explanation and prediction, see Douglas, "Reintroducing prediction to explanation".

tions have been raised against Hempel's models considered as models of predictions. I argue that it is why the logical structure of predictive arguments have not given birth to many philosophical research programs. Yet, covering law models set neither necessary nor sufficient criteria to define scientific predictions.

Following Zahar⁸⁵ and Musgrave⁸⁶, I show that predictions are not restricted to temporally novel phenomena. One may also define a predicted fact with heuristic (also known as use-novel) or theoretical novelty if a phenomenon is not used in the formulation of an hypothesis or not explained by rival hypotheses. These definitions have a clear interest in the context of confirmation, but also fit the way scientists talk about predictions of past facts (retrodictions or postdictions) or already known phenomena⁸⁷.

The core of covering law models is that laws are indispensable premises of predictive arguments. I argue that this conception is misleading because it reflects a bias toward theory driven researches. Observers and experimenters often use interpolation or extrapolation to fix the value of some variable. In *Aspects of Scientific Explanation*, Hempel replies that these procedures implicitly rely on statistical laws. I argue that if we spell the general assumptions underlying extrapolation and interpolation out, we do not get laws — at least, not laws as Hempel defines them. I therefore agree with Carnap's thesis⁸⁸ that predictions do not need laws to be derived.

These objections against covering law models of predictions show that they do not state *necessary* conditions to define scientific predictions. Chapter 1 ends with the proof that they cannot outline *sufficient* criteria either because they are inconsistent. One of the major constraints of these models on predictive and explanatory arguments is that their

⁸⁵Zahar, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)".

⁸⁶Musgrave, "Logical versus Historical Theories of Confirmation".

⁸⁷See for example Weinberg's argument in favour of the cosmological theory of inflation: "It's not fair to say inflation hasn't made any new predictions. After all, when Newton calculated the length of the month in terms of the acceleration of gravity at the earth's surface and the distance of the moon, that was already known, but it was such a good numerical calculation that worked, it was clearly convincing." Lightman and Brawer, *Origins*, p. 458 .

⁸⁸Carnap, *Logical Foundations of Probability*, pp. 574-575.

premises should be empirically adequate and true. But in the premises of predictive arguments, we also find boundary conditions. These hypotheses define the region of applicability of the covering laws embodied in differential equations. Following Hempel, if predicted events occurs in the future at time t , then boundary conditions are supposed to hold true from present time to t . However, except in rare cases, we cannot empirically verify these boundary conditions before t . Consequently, these conditions are often simplified or fictional hypotheses, which are assumed only for the sake of deriving a prediction. Therefore, they do not satisfy Hempel's condition of empirical adequacy.

An example of such boundary condition has been given and studied by Saatsi and Vickers⁸⁹. I give two more examples: the boundary conditions used to derive Kepler's laws from Newton's theory of gravitation and to predict the redshift of galaxies from de Sitter's model of the Universe. I argue that these boundary conditions are indispensable and impossible to test by other means than the prediction itself.

I conclude chapter 1 by showing that the structure of law-driven predictions can be reconstructed using Carnap's conception of predictions in *The Philosophical Foundations of Physics*.

Chapter 2: data-driven and model-driven predictions in historical natural sciences

In chapter 2, I study predictive arguments that do not essentially rely on scientific law. I study two controversies about the predictive power of historical natural sciences, *i.e.* natural sciences with particular objects such as Earth's morphology or the history of living species, in order to show that scientists have designed new methods of prediction.

The predictive power of geomorphological models has been discussed since the 1990s. I show that predictions have been derived from two kinds of models. Some models are based on simplifying assumptions and generate *robust* predictions. Predicted results are robust when they remain stable within a broad range of initial parameters. Therefore these

⁸⁹See Saatsi and Vickers, "Miraculous success? Inconsistency and untruth in Kirchhoff's diffraction theory" and Vickers, "A Confrontation of Convergent Realism".

predictions have an important generality — they are correct for a large number of systems — even if they are not extremely precise. I have called this kind of predictive argument based on simplified assumptions *model-driven predictions*.

On the other hand, some models include a great number of details and use a large variety of data in order to represent one specific real-world system (a river or a shore for example). These predictions have few targets but are very precise. I have called these predictions based on data of different natures and from different origins *data-driven predictions*.

Each of these kinds of predictions has its own uses, but none rely essentially on laws. If we acknowledge them as genuine predictive arguments, the controversy about the predictive power of historical natural sciences can be easily solved. Nothing about the object or method of these sciences stop them from being predictive, as long as we do not expect them to provide law-driven predictions as in physics or astronomy.

For example, evolution of species is deemed to be an unpredictable phenomenon. The capacity of Darwin's theory to explain past evolutions and its (assumed) inability to predict future adaptations has even been used as an objection against covering law models of explanations⁹⁰. Yet, recent studies show that evolutionary events can be partially predicted using large databases cross-referencing results from different fields such as development biology, epigenetics and ecology⁹¹. These studies show that data-driven predictions can succeed where law-driven predictions have failed.

I conclude chapter 3 by examining the emergence of *Big Data* sciences. I show that the use of *Big Data* may not represent a new paradigm of scientific activity as some have claimed⁹² but proves nonetheless that it is reckless to assert that some science are doomed to have no predictive power.

I conclude the first part of this dissertation by arguing that prediction

⁹⁰See Scriven, "Explanation and Prediction in Evolutionary Theory", and Mayr, "Cause and effect in biology: Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist".

⁹¹See Orgogozo and Stern, "Is Genetic Evolution Predictable?"

⁹²See Hey, Tansley, and Tolle, *The Fourth paradigm: data-intensive scientific discovery*.

has an open-texture meaning evolving with the apparition of new scientific tools. That is why it is so difficult to pin down necessary characteristics of predictive arguments. However, it is sufficient for my purposes to define three models of predictions: law-driven predictions, model-driven predictions and data-driven predictions. I argue that these predictions are not all structurally identical with explanation but represent good heuristic tools to discover of new explanations. Some data correlation between two variable used in a prediction may for example lead to the discovery of a causal connection or of a common cause.

Part 2 : predictions in the history of modern cosmology

Given the plurality of predictions studied in the first part, I examine in the second part which predictions played a part in the establishment and development of cosmology as a domain of scientific inquiry. Cosmology is the study of the Universe as a whole, *i.e.* as the global structure of all physical phenomena. I have chosen to study this specific science not only because it is part of astronomy and astrophysics which are often considered as prime examples of predictive sciences, but also because of cosmology's specific characteristics. It is a young science — the birth-certificate of modern cosmology is Einstein's paper of 1917⁹³ — which has known many debates and controversies regarding its method and the uses of predictions. As a consequence, cosmologists often explicitly discussed the role and consequences of predictive successes.

Chapter 3: the role of predictions in the birth of modern cosmology (1917-1939)

The first period of modern cosmology has been described as the era of "geometrical cosmology" or as a "small mathematical industry"⁹⁴. Historians of modern cosmology have shown that early cosmological models

⁹³See North, "The Early years", p. 11.

⁹⁴Kragh, *Cosmology and Controversy*, p. 12.

arose from theoretical and speculative preoccupations such as the consistency of General Relativity or its compatibility with Mach's principle. These models did not had much empirical consequences, and it seems that their predictions were not discussed and considered as successful.

In chapter 3, I show that if this observation is correct for two of the founding fathers of modern cosmology — Einstein and Friedman — others early cosmologists did put an emphasis on the predictive power of their cosmological models. De Sitter's world model for instance, while being static, predicted as early as 1917, that spectra of distant galaxies should be redshifted. This "de Sitter effect" was well-known among astronomers of the 1920s and led Hubble to investigate the relation between the distance of galaxies and their redshift in 1929⁹⁵.

Lemaître was the first comologists who intensively tried to connect cosmological models with observations. In his 1927 paper⁹⁶, he rediscovered Friedman equations describing a dynamical universe in expansion and used it to predict the relation between the distance of galaxies and their redshift. Unfortunately, his paper being published in French in a Belgian journal did not had the impact it deserved. But its translation in English in 1931⁹⁷ — after the publication of Hubble's results — was celebrated by famous cosmologists such as Eddington, Robertson, Milne, Einstein and de Sitter. This successful prediction thus played an important part in the transition of cosmology from statical to dynamical models of the Universe.

I conclude chapter 3 by asking why Lemaître's prediction was more successful than de Sitter's effect. Both are confirmed by Hubble's discovery and derived from General Relativity and (idealised) auxiliary hypotheses. This is a clear case of what I call *predictive underdetermination*: the same predicted result can be derived in the framework of the same theory by different arguments using different set of hypotheses.

However, while Lemaître's dynamical Universe was as complex and

⁹⁵Hubble, "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae".

⁹⁶Lemaître, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques".

⁹⁷Lemaître, "A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae".

counter-intuitive (for the scientists of the 1920s) as de Sitter's empty Universe, the derivation of de Sitter's effect was extremely cumbersome. On the other hand Lemaître's prediction of the redshift of galaxies was much more easy to derive. It was deemed more "natural" and "simple" by de Sitter himself⁹⁸. Lemaître's prediction proved that dynamical models of the Universe could easily lead to new predictions of observational data and increase the predictive capacity of cosmology. Thus, it is not this prediction *per se* which convinced cosmologists, but the perspective it opened for all the scientific community. That is why I argue that *fertility* is a key aspect of predictions involved in scientific change.

Chapter 4: predictions and the Big Bang theory (1948-1970)

Historian of science Stephen Brush has studied many case of predictive successes and conclude that, in most cases, predicted evidence did not impact scientists' judgement more than accommodated data. One of the few case where predictions did play such a role was the controversy between the steady state theory and the primordial nucleosynthesis theory (soon known as the Big Bang theory). For Brush, this role of prediction is solely imputable to the adhesion of steady state theorists Bondi, Gold and Hoyle to the "Popper principle"⁹⁹ which states that a theory should be rejected when one of its prediction is disproved by empirical evidence. The steady state theory would then has been refuted by the discovery of the cosmic microwave background in 1965 which goes against the claim of the steady state theory that the Universe maintains the same mean density despite its expansion.

In chapter 4 I claim that Brush's analysis of the controversy between the steady state theory and the Big Bang theory is incorrect because it focuses on an isolated prediction and separate it from its context. It is true that Bondi, Gold and Hoyle often use (implicitly or explicitly) some aspects of Popper's philosophy in order to defend the scientific status

⁹⁸See Kragh and Smith, "Who Discovered the Expanding Universe?", p. 158.

⁹⁹Brush, "Prediction and theory evaluation: cosmic microwaves and the revival of the Big Bang."

of their theory. But the discovery of the cosmic microwave background did not trigger the rejection of the steady state theory. In fact, this theory was celebrated in the 1950s for its precise and definite predictions regarding the deceleration of the Universe or the nucleosynthesis in stars. But in the 1960s, the steady state theory was added lot of auxiliary hypotheses in order to account for the nucleosynthesis of Helium, the discovery of quasars, of radiosources and, finally, of the cosmic microwave background. The steady state theory collapsed under its own weight well before the COBE satellite refuted it in 1989 with the proof that the cosmic microwave background has a black-body spectrum. Only Hoyle and its pupil Narlikar still worked on modified versions of the steady state theory after the end of the 1960s.

On the other hand, the predictive capacity of the Big Bang theory began to grow at the end of the 1950s. Alpher and Herman's 1948 prediction of a fossil radiation coming from the early Universe was independently rediscovered in 1965 by Dicke and Peeble. It showed how nuclear physics could be linked with cosmology and made of the early Universe a topic of interest for particle physics. Moreover, the "Renaissance of General Relativity" in the 1960s opened the possibility to apply Penrose's, Hawking's and Ellis' singularity theorems to the Universe as a whole. With the Big Bang theory, cosmology was integrated to other fields of physics and astronomy. This led to a spectacular increase of the predictive capacity of cosmology and the hope that new connections between theoretical hypotheses and data would be discovered.

In a nutshell, Brush's analysis of the Big Bang theory case is too crude to be satisfying. It is true that isolated predictions do not influence dramatically the course of science. But series of successful predictions in a given context do impact the judgement of scientists when they suggest a growth in the predictive capacity of a theory. This shows the importance of distinguishing between *predictive capacity* and *predictive power*. The latter indicates the ability of a theory to perform *at least* one prediction: it can be evaluated *a priori*, just by checking if the theory has empirical consequences. The former is used to assess the variety and the precision of the predictions derivable from a theory. It cannot be evaluated *a*

priori: it is only after scientists have actually derived new predictions and tested them that one can measure the predictive capacity of a theory. The only thing we (and especially scientists) can do is trying to evaluate if the predictive capacity of a theory can grow in the future.

I conclude chapter 4 by arguing that the Big Bang case shows that scientists do not value all successful predictions but only fruitful predictive successes. *Fruitful predictions* are the ones which open the road for new predictions and indicate that the hypotheses on which they are based are susceptible to have an important predictive capacity.

Chapter 5: predictions and the theory of inflation since 1970

The theory of inflation is an illuminating case of hypothesis developed to save a theory from refutation. In the 1970s, cosmologists formulated a *standard cosmological model* based on the Big Bang theory. This standard model faced several problems such as the problem of the origin of structures (stars, galaxies and cluster of galaxies), the horizon problem and the flatness problem. The physicist Alan Guth in 1981 proved that these two last problems disappear if we suppose that the Universe has known a phase of exponential expansion right after the Big Bang.

Despite the keen interest provoked by Guth's hypothesis, the theory of inflation attracted severe objections. Popper considered it *ad hoc* and non-scientific¹⁰⁰. Cosmologist such as Guth and Steinhardt were concerned that the multiplication of models of inflation has made it irrefutable.

In chapter 5, I show that there is one prediction from the theory of inflation which could confirm or refute it: the prediction of primordial gravitational waves which should be observable in the cosmic microwave background. These gravitational waves were predicted as early as 1980 by the Russian cosmologist Starobinsky who developed a model of inflation before Guth. But what is striking is that even if these primordial

¹⁰⁰See the letter addressed to the historian of cosmology Helge Kragh in Kragh, "Karl Popper on physical cosmologies".

gravitational waves have not yet been detected, the theory of inflation have largely been accepted by the community of cosmologists.

This shows that risky predictions that can refute a theory are essential to test a theory, but not necessary. The theory of inflation has proved its fruitfulness since the 1990s because it furnished the first theory of the origin of structure. With the launch of the COBE satellite in 1989, astronomers and cosmologists have a map of the anisotropies of the cosmic microwave background. These anisotropies are the differences of density which later gave birth to stars and galaxies. The theory of inflation can predict the size and shape of these anisotropies by modelling how quantum fluctuations have been stretched by the exponential expansions of the Universe. Some of these predictions are common to all models of inflation (they are *robust* predictions), others are specific to some models of inflation and may discriminate among these models.

I conclude chapter 5 and part 2 by remarking that if Popper is often quoted by cosmologists, refutation is not the only kind of success reachable by predictions. I emphasize the importance of simplicity, robustness and fruitfulness in the derivation of a prediction. Theories and hypotheses manifesting these virtues in their predictions are often preferred by scientists because they bet that the predictive capacity of these theories and hypotheses will grow over time. In the third part, I discuss the rationality of this bet.

Part 3 : the role of predictions in the choice of hypotheses

The third part of the dissertation examines the role of predictive test in the confirmation or refutation of scientific hypotheses. The primary goal of this part is to determine whether the impact of predictions on the behaviour, judgement and choices of scientists described in the preceding part is rational and legitimate or not. *Antipredictivism* is the thesis according to which successful predictions may strike our imagination but should not have any special weight in the choice of hypotheses. *Predictivists*, on the other hand, claim that predicted evidence has more weight

than accommodated evidence. I distinguish between *unconditional predictivism* — which claims that predictive evidence is in all circumstances better than accommodated evidence and that successful predictions are necessary to confirm an hypothesis at the higher degree — and *conditional predictivism* — which states that predicted evidence is in some situation a better test for an hypothesis than other kinds of evidence.

This part looks at different arguments from predictivism and anti-predictivism in order to define a rational predictivist position. I examine which predictive successes may play a part in the confirmation or refutation of hypotheses and which kind of predictivism they call for.

Chapter 6: the debate on predictivism

In chapter 6, I list all the arguments that have been proposed against or in favour of predictivism since the Whewell-Mill debate where the question of the evidential support of predictions appeared for the first time.

The major anti-predictivist objections are the following:

- *Mill's problem.* In chapter 14 of his *System of logic* Mill acknowledges the practical advantages of the hypothetical method (which rely on predictions) to anticipate experiments, but considers that this method is equivalent to the inductive method in only one case: when the hypothesis predicting a fact has no alternative. Otherwise, predicting a fact from an hypothesis is no proof of this hypothesis, and the value of successful predictions is only imaginary.
- *Keynes's problem.* In chapter 1 of the *Treatise on Probability*, Keynes states what I have called the principle of purity of confirmation: the relation of confirmation should involve only characteristics of an hypothesis h , evidence e and their *logical* relations. Yet, the fact that evidence e was predicted by hypothesis h states a *chronological* relation between e and h . Whether e was predicted or not should therefore be irrelevant for the confirmation of h .
- *Duhem's problem.* Even if Duhem can be considered as a predic-

tivist, he did formulate one of the major objections against predictivism: if predictions can only be derived from set of hypotheses, how can we identify which hypotheses are confirmed or refuted by a predictive test?

- *The problem of old evidence.* This problem is encountered by conceptions of theory-choice stating that the more a prediction is surprising, the more it confirms an hypothesis. For these conceptions, already known evidence should have no supporting weight. Yet, in some cases, known evidence had dramatic importance in the acceptance of new theories. The classic example (first used by Zahar to object Lakatos' Methodology of Research Programs¹⁰¹ and rediscovered by Glymour to criticise Bayesian Theories of Confirmation¹⁰²) is the 1915 confirmation of General Relativity by the precession of the perihelion of Mercury known since the 19th century.

To answer these problems, predictivists devised different counter-arguments:

- *Whewell* have shown at several occasions that predictive tests of hypotheses are safeguards against bias such as selecting data in order to retain only supporting evidence.
- *Whewell* and *Lakatos* both emphasized that theories supported by predicted evidence have more chance to be simple than other theories because if a theory has known predictive successes, there is no need to add cumbersome auxiliaries to accommodate new data.
- *Goodman's theory of projection* shows that in order to solve the new riddle of induction, it is necessary to take into account, in the relation of confirmation between h and e , some record of past projections (*i.e.* predictions). Therefore, it is necessary to amend Keynes's principle of purity of confirmation: the relation of confirmation entails some background informations about the context of

¹⁰¹See Zahar, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)".

¹⁰²Glymour, *Theory and evidence*.

confirmation. And these background informations may include the fact that h has predicted some evidence e .

- *Zahar* and *Musgrave* have developed conceptions of novelty which differ from temporal novelty (see chapter 1) to answer the old evidence problem.
- *Peirce* has given what I consider to be the most powerful argument in favour of predictivism. In his *Theory of probable inference*, Peirce shows that it is always possible, for a given sample of already known data, to formulate an hypothesis which fits the data of the sample but does not fit other data of the same population. This is a case of overfitting: the hypothesis describes the idiosyncratic characteristics of a sample but fails to catch the genuine relations among the data of a population. Peirce argues that overfitting can be avoided if an hypothesis is "predesignated", *i.e.* is tested by predicting the characteristics of new sample of data.

In the next chapter, I use these counter-arguments to define a predictivist position which is both consistent and compatible with the role of prediction in actual scientific practices.

Chapter 7: predictive capacity and confirmation

In chapter 7 I show that the problem of old evidence can be avoided if we define predictions using Zahar's heuristic novelty or Musgrave's theoretical novelty. I claim that Mill's and Keynes's problems are also dissolved if we follow Lipton's reconstruction of Whewell's and Peirce's arguments.

Lipton's predictivist argument, known as the "fudging argument"¹⁰³ is based on the idea that the characteristics of hypotheses and evidence involved in theories of confirmation constitute theoretical and empirical virtues, such as the simplicity of an hypothesis (theoretical virtue) or the diversity of evidence (empirical virtue). Lipton further argues that if an hypothesis is used to predict a set of data, there is no risk of "fudging",

¹⁰³See Lipton, "Testing Hypotheses: Prediction and Prejudice".

i.e. there is no possibility to give up theoretical virtues (such as the simplicity of the hypothesis) to maximise empirical virtues (such as the diversity or precision of data). Predictive tests are important because they manifest some theoretical virtues.

Hitchcock and Sober¹⁰⁴ have shown that this kind of argument can only support *conditional* predictivism, because if predictions play a part in the confirmation of hypotheses only as tools indicating the presence of some theoretical virtues, they can be replaced by other procedures. In the case of curve-fitting problems, the Akaike Criterion of Information can prove that an hypothesis is not overfitted without the use of any predictive test.

However, I agree with Douglas and Magnus¹⁰⁵ who argue that procedures such as the Akaike Criterion of Information are the exception more than the rule. Duhem's problem proves that when we are not testing isolated hypotheses against raw data but complex theoretical frameworks, it is difficult to circumscribe which hypotheses may be fudged by such strategies. As Kuhn already remarked¹⁰⁶, theoretical virtues are not obvious, clear and objective characteristics of theories. This is why predictive tests are crucial: in a lot of actual situations of confirmation, they are the only available option to determine whether or not a theory embodies virtues such as simplicity or plausibility.

I conclude chapter 7 and part 3 by arguing that if an hypothesis sacrifices one of its theoretical virtues, there is no hope that its predictive capacity may increase. For example, if an hypothesis is too complex, then it will not be applicable to new domains of experience because it will be practically impossible to derive new predictions. Reciprocally, if an hypothesis fails a predictive test, it is often because one of its virtues has been sacrificed (for example, the plausibility of its auxiliaries). Predictive successes displaying the theoretical virtues of an hypothesis confirm that nothing prevents the growth of the predictive capacity of this hypothesis.

¹⁰⁴Hitchcock and Sober, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting".

¹⁰⁵Douglas and Magnus, "State of the Field".

¹⁰⁶See Thomas Kuhn, "The Essential tension", Chicago, Chicago University Press, 1977, chap. Objectivity, value judgment, and theory choice, pp. 320–339.

Therefore scientists are behaving rationally when they bet that predictive capacity of a theory may increase in the future on the ground that some of the successful predictions of this theory are *fruitful*, *i.e.* open the road to new predictions.

Part 4 : novel predictions and scientific realism

I begin the fourth part by some clarification. In the context of scientific realism, the notion of truth implies not only that an hypothesis is empirically adequate, but also that it reflects a mind-independant reality. Consequently, true hypotheses are irrevocable: they can be rephrased, modified, translated in new theoretical languages but never completely eliminated.

Therefore, I do not define scientific realism using the observable/non-observable distinction, but only this irrevocability of true hypotheses. Scientific realism is the claim that our best theories are true or partially true, *i.e.* that some of their informative content about the world is correct and definitive.

In this part of the dissertation, I examine if some successful predictions, known as *novel predictions*, can ensure us that the depiction of reality offered by a theory enjoying predictive successes are worthy of belief, *i.e.* warrant ontological commitments.

Chapter 8: the no miracle argument based on novel predictions and its problems

In chapter 8, I examine different versions of the no miracle argument based on the predictive success of mature theories.

The first version of this argument is the most famous one and can be traced back to Whewell: it is an inference to the best explanation. If we consider that predictive successes of scientific theories are so surprising that they call for an explanation, truth of these theories are the best

explanation we can get because if theories are true these successes are not generated by a cosmic coincidence or a miracle.

This version of the no miracle argument has been intensively discussed. Laudan and modern historians of sciences have shown that past theories also enjoyed predictive successes and yet are today considered as false. This is the basis of the so-called "pessimistic induction" which concludes that our present theories, which however probable they may appear today, will probably be superseded by better theories and considered as false in the future. This pessimistic induction implies that the predictive successes enjoyed by confirmed theories are not surprising enough to make a theory worthy of belief. Novel predictions underlying the no miracle argument must be more specific and impressive than predictions carrying mere confirmatory weight.

I examine definitions of novel predictions proposed by Worrall, Lepin and Alai. I investigate the paradigmatic case of the prediction of the bright spot derived from Fresnel's optics and conclude that none of these definitions of novel predictions can support the no miracle argument. The reason is that these realists face the following dilemma: they want novel predictions to be derived from laws or models, but these predictions rely on idealisations or abstractions (see part 1). Using Chakravartty's distinction between abstraction and idealisation, I claim that idealised boundary conditions used in predictive reasoning should be of real concerns for realists.

The second version of the no miracle argument can be traced back to Poincaré and has the form of an indispensability argument. If an hypothesis is indispensable to the predictive success of a theory, then it is true and will be retained through theory change. This version of the no miracle argument has given birth to *deployment realism* and selective realists' strategies such as Psillos' *divide et impera* move. Selective realism is the claim that only parts of past theories are true. This position is designed in order to resist the pessimistic induction and to circumscribe the true aspects of past theories. Reconsidering the case of the bright spot I emphasize that procedures such as the *divide et impera* move can only be performed from the vantage point of modern science. I suggest

that most successful novel predictions are cases of predictive underdetermination (see part 2): they can be derived from different hypotheses in the same theoretical framework. It is therefore very difficult to prove that a given hypothesis is indispensable to the predictive success of a theory, because alternative derivation of the same prediction may exist or be discovered.

That is why I argue that *prospective realists* such as Votsis may be too bold. *Prospective realism* claims that realists should be able to predict which aspects of our present theories are likely to be retained in future theories. I object that the future of science is not actually predictable. Even if we had a meta-theory that predicted the future of scientific theories, this meta-theory would be subject to refutation and scientific change, and its predictions may turn out to be false. Vicker claims that we can identify idle posits of present theories and predict that they will be eliminated by next scientific revolutions. However, even dispensable hypotheses may have other roles than generating novel predictions (they may have pedagogical or heuristic virtues for example) and be retained.

I conclude chapter 8 by examining the last version of the no miracle argument, formulated by Duhem. We cannot help but believe in the truth of theories enjoying predictive success, it is a powerful psychological impulsion. Duhem describes this impulsion by referring to Pascal's "vérité du cœur", *i.e.* an intuitive truth impossible to prove by deduction. Therefore, this version of the no miracle argument is barely an argument at all: it is only the acknowledgement of an intuition. In the next and final chapter, I try to clarify and justify this intuition by showing that predictive success can support another argument in favour of scientific realism: the experimental argument.

Chapter 9: prediction and experimentation

Apart from the no miracle argument, one of the most discussed arguments in favour of scientific realism is the experimental argument. This argument states that our causal knowledge of entities postulated by scientific theories enables us to manipulate them and justify our belief in

their existence.

This argument was developed by Hacking in *Representing and Intervening* as an argument that does not rely on the success of theory, but on experimental practices. This version of the experimental argument does not make any use of predictive successes. Another version of the argument is Chakravartty's argument in favour of *semirealism*, which states that our degree of belief in the existence of entities and properties is proportional to the degree of causal connections we have with these entities and properties.

I argue that Hacking's version of the experimental argument has some flaws but well resists the pessimistic induction, because experimental techniques are usually retained through theory change. Chakravartty's version of the argument avoids some of the problems of Hacking's argument but is more vulnerable to the pessimistic induction. I propose to base the experimental argument on the link between prediction and experimentation in order to retain the best of both arguments.

First, I use Popper's notion of *technical predictions* to define *technical predictive successes*. Technical predictions are the ones that informs the experimenters or observers on the way they can obtain a given result, *i.e.* they state that if some given variables have some given values, then some phenomenon should be observable. When experimenters start designing an experimental device according to one of this prediction, they believe that the variables they are manipulating must be correlated with *some* properties of the phenomenon they try to observe. Therefore, even if the experiment does not give the right result, as long as experimenters produce stable experimental devices based on technical predictions, they do believe in the reality of the properties correlated with the ones they are manipulating.

I conclude chapter 9 and part 4 by sketching the realist commitment entailed by the experimental argument. I show that Chakravartty is right to claim that if we believe in the existence of entities, we are committed towards the belief in the structures through which we have knowledge of these entities. Yet, I argue that this commitment is a very thin one: if we are committed towards the existence of properties correlated with the

variables we manipulate, successful technical predictions are not enough to warrant that the theoretical description of the causal structure linking the entities exhibiting these properties is true. I claim that this position is coherent and compatible with the scientists' natural stance towards their theories and hypotheses: they do have an objectivity, even if we cannot be sure that what we know about this objectivity is correct.

Conclusion

In the conclusion, I summarize the major results of the dissertation:

- Predictive successes are not the only successes of empirical sciences.
- Predictive reasoning come in many forms and structures, and therefore different kinds of predictive successes may coexist. There is no *a priori* reason to think that some sciences have no predictive power.
- Isolated predictions are not considered as important successes by scientists and have not any special confirmatory weight. But fruitful predictions opening the road towards new predictions and indicating the predictive capacity of underlying hypotheses or theories do have an influence on scientific change.
- Successful predictions weight in the confirmation of hypotheses as long as they reveal that some theoretical virtue of hypotheses has not been sacrificed.
- Novel predictions may not fuel the no miracle argument and the *divide et impera* move, but technical predictive successes play a part in the experimental argument in favour of scientific realism.

I conclude by sketching several possible continuations of the analysis of predictions:

- If all sciences may have predictive power, it should be noted that their predictive capacity may not be the same or change in the same

manner. It would be interesting to examine how biological sciences and social sciences have developed their predictive capacity.

- Lipton's conception of confirmation based on theoretical and empirical virtues is a fruitful one. Some recent efforts have been made to develop it¹⁰⁷. It should be noticed that this conception can be traced back (at least) to Kuhn's criteria of theory-choice and is very similar to the conception of model-building in biological sciences¹⁰⁸. It opens up the possibility to establish a new approach of confirmation that does not separate the formulation and the test of hypotheses.
- The realists' dilemma and the notion of predictive underdetermination need further examinations in order to determine whether they represent a genuine threat against selective realism.
- Finally, it would be interesting to refine the analysis of the relations between prediction and experimentation in order to see how these two practices entwine. It may lead to conceive the truth of scientific theories not as a reflection of reality but as a force of invention, as suggested by Russell in the following lines:

Science thus encourages abandonment of the search for absolute truth, and the substitution of what may be called "technical" truth, which belongs to any theory that can be successfully employed in inventions or in predictions. [...] "Knowledge" ceases to be a mental mirror of the universe, and becomes a practical tool in the manipulation of matter¹⁰⁹.

¹⁰⁷See Keas, "Systematizing the theoretical virtues".

¹⁰⁸See Weisberg, "Forty years of "The strategy": Levins on model building and idealization".

¹⁰⁹Bertrand Russell, *Religion and Science*, Oxford, Oxford University Press, 1935, p. 15.

Annexe au chapitre 1 : extrapolation, interpolation et zone expérimentale

Définir la différence entre extrapolation et interpolation est une affaire moins simple qu'il n'y paraît au premier abord. Voici la définition mathématique de ces termes (voir figure 1) :

Interpolation : construction d'une courbe passant par un nombre fini de points.

Extrapolation : construction d'une courbe satisfaisant un certain nombre d'exigences relatif à l'écart moyen avec un nombre fini de points.

Cette définition est rigoureuse et cohérente, mais ne reflète pas les usages qui sont faits de ces termes dans la pratique scientifique, notamment dans les sciences expérimentales où cette distinction repose sur l'idée que l'extrapolation est plus risquée que l'interpolation¹¹⁰. Dans ces disciplines, ces notions sont ainsi définies :

Interpolation : estimation de la valeur d'une variable Y pour une valeur de la variable X donnée qui se trouve dans la *zone expérimentale*, c'est-à-dire la même *population*.

Extrapolation : estimation de la valeur d'une variable Y pour une valeur de la variable X donnée qui se trouve en dehors de la *zone expérimentale* (dans une autre *population*).

¹¹⁰Voir FORSTER, "Key concepts in model selection : Performance and generalizability".

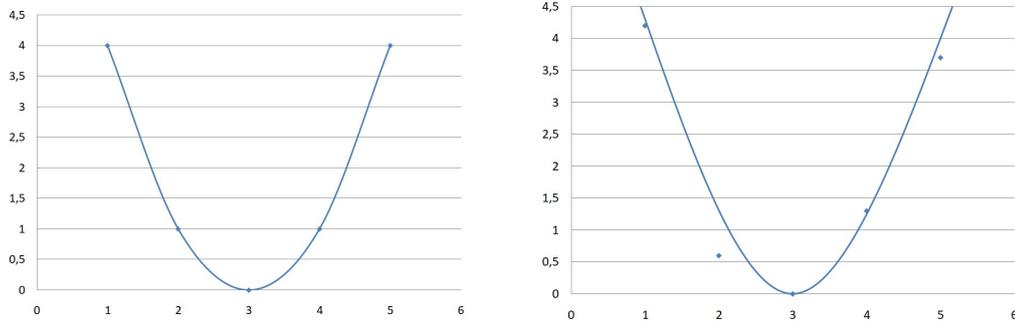


FIGURE 9.6 : L'interpolation mathématique, à gauche, consiste à trouver la formule d'une courbe passant par *tous* les points. Il est rare que la formule trouvée soit simple comme dans l'exemple ci-dessus où la formule utilisée est un polynôme du second degré. L'extrapolation mathématique, à droite, consiste à trouver une formule en spécifiant à quelle famille elle appartient (ici, les polynômes de second degré) et l'écart moyen aux point des données acceptables (ici : 0,4).

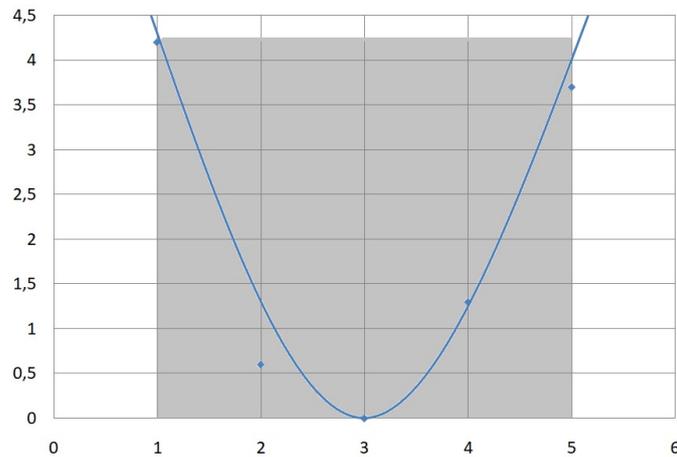


FIGURE 9.7 : La *zone expérimentale* ou *population* est traditionnellement conçue comme l'intervalle entre les valeurs maximales et minimales des données. Dans cet exemple, cette zone s'étend de 1 à 5 en abscisse, et de 0 à 4 en ordonnées.

Ces définitions de l'interpolation et de l'extrapolation en font des inférences prédictives qui ne diffèrent que sur leur portée : à l'intérieur ou à l'extérieur de la « zone expérimentale ». Cette notion désigne l'intervalle des valeurs d'un échantillon de données D (voir figure 2).

Le problème est que cette définition a pour conséquence que certaines interpolations peuvent se révéler plus risquées que des extrapolations. Prenons l'exemple de cinq données a, b, c, d et e telles que :

Donnée	X	Y
a	0	0,5
b	5	3,5
c	10	12,5
d	10,5	?
e	7	?

Si l'on cherche à prédire la valeur de la donnée d en Y qui correspond à la valeur $X = 10,5$, on réalise une extrapolation. Et pourtant elle est bien moins « risquée » qu'une interpolation pour estimer la valeur de la donnée e en Y correspondant à $X = 7$. En effet, les valeurs de d sont « plus proches » des valeurs déjà connues de c que les valeurs de e. Il faudrait que la corrélation entre X et Y soit *très* chaotique pour que la valeur réelle de d en Y s'écarte de beaucoup de celle que l'on obtiendrait par une extrapolation fondée sur une régression linéaire ou polynomiale. À l'inverse, il semble plus probable que la valeur réelle de e en Y s'écarte de beaucoup si l'on réalise une interpolation fondée une régression linéaire ou polynomiale (voir figure 3 pour un exemple).

Pour conserver l'intuition selon laquelle l'interpolation est moins risquée que l'extrapolation, il faut redéfinir la notion de zone expérimentale, en l'étendant au-delà des valeurs minimales et maximales observées pour X et Y .

Pour cela, on commence par définir Δ_X et Δ_Y , les distances maximales entre deux valeurs consécutives de données :

Distances maximales entre valeurs consécutives

Soient x_1, \dots, x_n (respectivement y_1, \dots, y_n les abscisses (respectivement

les ordonnées) de n donné, telles que $x_i < x_j$ (respectivement $y_i < y_j$) si $i < j$ (pour tout i et j compris entre 1 et n).

$\Delta_X = \|x_{i+1} - x_i\|$ s'il n'existe aucune donnée j telle que $j \neq i$ et

$$\|x_{j+1} - x_j\| > \|x_{i+1} - x_i\|$$

$\Delta_Y = \|y_{i+1} - y_i\|$ s'il n'existe aucune donnée j telle que $j \neq i$ et

$$\|y_{j+1} - y_j\| > \|y_{i+1} - y_i\|$$

On peut à présent redéfinir la notion de zone expérimentale :

Zone expérimentale

Toute prédiction d'une valeur x^* (respectivement y^*) de la variable X (respectivement Y) est dans la zone expérimentale et est une interpolation si et seulement si :

$$x^* \in [x_1 - \Delta_X, x_n + \Delta_X]$$

Respectivement :

$$y^* \in [y_1 - \Delta_Y, x_n + \Delta_X]$$

Dans tout autre cas, il s'agit d'une extrapolation (voir figure 4 pour une illustration).

Ces définitions de l'interpolation et de l'extrapolation étendent la zone expérimentale suffisamment pour conserver l'intuition que l'interpolation est une procédure moins risquée que l'extrapolation et les définitions classiques de ces notions utilisées en sciences expérimentales. Elles peuvent facilement être élargies à un nombre indéfini de variables.

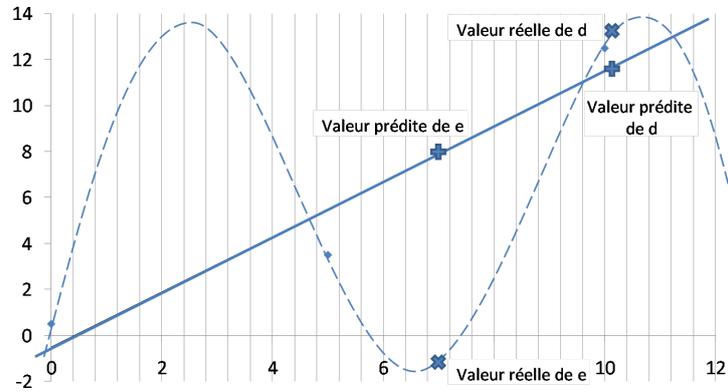


FIGURE 9.8 : Droite : courbe obtenue par régression linéaire. Courbe pointillée : corrélation réelle de X et Y . La régression linéaire amène à faire moins d'erreur pour la donnée d d'abscisse 10,5 que pour la donnée e d'abscisse 7.

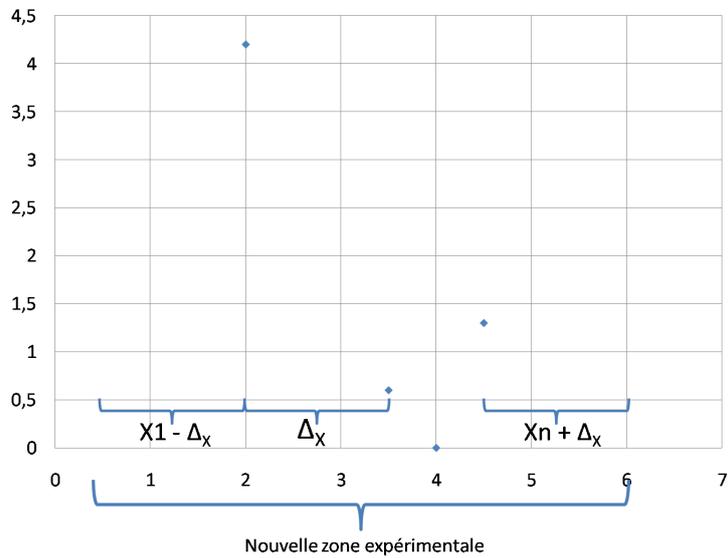


FIGURE 9.9 : La nouvelle définition de la notion de zone expérimentale étend celle-ci au-delà des valeurs minimales et maximales des variables, en y soustrayant ou rajoutant la distance maximale entre deux valeurs de données consécutives.

Annexe au chapitre 2 : controverses sur la théorie de l'évolution dans les années 1960-1970

Le statut de la théorie de l'évolution a donné lieu à plusieurs controverses durant les années 1960-1970, controverses animées aussi bien par des scientifiques que par des philosophes des sciences.

Parmi ces controverses, deux sont particulièrement importantes dans le cadre d'une thèse sur les succès prédictifs, parce qu'elles concernent la capacité de cette théorie à réaliser des prédictions et à être testée à partir de ces prédictions.

Le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution

Mayr, dans son article de 1961 « Cause and effect in biology » reprend les arguments de Scriven, comme on l'a montré dans la section 3.1.1 du chapitre 3. Cependant, il propose aussi une classification et une hiérarchisations de plusieurs types de prédictions : les prédictions qui ont le plus de valeur — c'est-à-dire de fiabilité — en biologie, sont les prédictions que l'on tire de la classification des espèces (en prédisant quels caractères aura un individu en connaissant son espèce), puis viennent les prédictions d'événements physiochimiques (par exemple sur l'action de la luminosité,

de la chaleur ou de l'électricité sur certaines voies métaboliques), ensuite les prédictions sur le résultat d'interactions écologiques complexes (par exemple entre deux espèces en compétition dans la même niche écologique) et enfin, tout en bas de l'échelle, les prédictions d'événements adaptatifs :

Probablement rien en biologie n'est moins prévisible que le cours futur de l'évolution. Qui aurait pu prédire, en considérant les reptiles du Permien, que la plupart de ces groupes les plus florissants allaient s'éteindre, et qu'une de leurs branches les moins remarquables allaient donné naissance aux mammifères¹¹¹ ?

En d'autres termes : même si les dinosaures avaient eu connaissance de la théorie de l'évolution ils n'auraient pas pu prédire leur disparition prochaine ; en revanche, nous pouvons, de notre époque, expliquer cette disparition. Les raisons que donne Mayr de cette incapacité de la théorie de l'évolution à fournir des prédictions sont comparables avec celles évoquées par Scriven. Il y a en effet pour Mayr deux causes d'aléatoire qui empêchent de prédire le résultat d'épisodes évolutifs : les changements dans l'environnement des entités biologiques sont stochastiques et les mutations des entités biologiques adviennent aussi au hasard.

Ainsi, Mayr comme Scriven dirigent leurs arguments contre la thèse de Hempel selon laquelle les raisonnements prédictifs et explicatifs ont la même structure logique et que l'explication d'une occurrence passée d'un phénomène ne diffère pas de la prédiction d'une occurrence future de ce même phénomène.

Dans *Aspects of scientific explanation*, Hempel répond à cette objection contre la thèse de l'identité structurale. Il distingue la *théorie* de l'évolution de l'*histoire* de l'évolution¹¹². Cette dernière n'est pas prévisible, mais la première s'appuie sur des lois qui expliquent aussi bien que prédisent. Cette distinction est classique parmi les biologistes et on la retrouve, sous des formes similaires, dans certains ouvrages et manuels,

¹¹¹MAYR, "Cause and effect in biology : Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist", p. 1505.

¹¹²HEMPEL, "Aspects of Scientific Explanation", p. 370.

comme celui de Patrick David et Sarah Samadi, qui distinguent entre un versant « historique » et un versant « mécanistique » de la théorie de l'évolution (seul ce dernier étant prédictif) :

Nous distinguerons deux versants dans les sciences de l'évolution : (i) *Un versant descriptif*, dont le but est de raconter l'histoire des êtres vivants sur Terre depuis leur apparition. [...] (ii) *Un versant explicatif*, dont le but est de décrire les lois et les mécanismes qui sous-tendent cette histoire. Il s'agit ici de proposer des liens logiques permettant de prédire les phénomènes observés ou de les comprendre *a posteriori*¹¹³.

Cependant, cette défense de Hempel n'est pas cohérente avec son modèle de prédiction. En effet, Hempel identifie prédiction et prévision de l'occurrence future d'un phénomène. On comprend donc mal quelles prédictions on pourrait tirer de la théorie de l'évolution qui ne concernerait pas l'histoire à venir de l'évolution. On pourrait rétorquer qu'un énoncé comme « Si une région devient inondable, alors les animaux sachant nager seront plus adaptés et donc avantagés » ressemble plus à une loi empirique qu'à un énoncé portant sur le futur. Mais, Hempel refuse autant de concéder qu'il puisse exister des prédictions de lois que des prédictions de faits passés. Son modèle de prédiction ne laisse donc aucune place pour des prédictions tirées de la théorie de l'évolution.

C'est pourquoi le philosophe de la biologie Zdzislaw Kochanski est obligé de modifier le modèle de prédiction de Hempel pour pouvoir affirmer que l'on peut tirer des prédictions de la théorie de l'évolution des prédictions¹¹⁴. Kochanski considère que pour Hempel, les prédictions concernent les données inconnues au moment de la prédiction. Il ne fournit cependant aucune citation ou référence probante pour soutenir cela. Puisque Mayr semble accepter, comme on l'a vu, que les biologistes sont capables de réaliser des conjectures correctes sur le passé, pour Kochanski c'est la preuve que la théorie de l'évolution permet bien de réaliser certaines prédictions. Cependant, Kochanski ne fournit pas d'exemple de phénomène ainsi prédit.

¹¹³DAVID et SAMADI, *La Théorie de l'évolution : Une logique pour la biologie*, p. 10.

¹¹⁴KOCHANSKI, "Conditions and Limitations of Prediction-Making in Biology".

C'est M. Williams qui a le plus fourni d'exemples de prédictions tirées de la théorie de l'évolution. La plupart de ses articles sont discutés dans le chapitre 3 de cette thèse, section 3.1.1. Mais pour les comprendre, il faut remarquer qu'ils n'avaient pas initialement pour objectif d'intervenir dans la controverse sur le pouvoir prédictif de la théorie de l'évolution, mais dans la controverse sur sa scientificité.

La controverse sur la testabilité et la scientificité de la théorie de l'évolution

Le statut de la théorie de l'évolution en tant que théorie testable et scientifique a été discuté dans les années 1960-1970, notamment par deux philosophes des sciences : Smart et Popper.

Smart, dans le chapitre III de *Philosophy and Scientific Realism* (1963) estime qu'il n'existe pas de lois en biologie, car tous les termes définis dans cette science « font implicitement référence à notre planète, la Terre »¹¹⁵. Cela implique, selon lui, que « les auteurs qui ont essayé d'axiomatiser la biologie ont considéré à tort que la biologie est une science ayant les mêmes caractéristiques logiques que la physique, comme par exemple la chimie. »¹¹⁶ En réalité, « on ne devrait pas s'attendre à trouver des "théories biologiques" mais plutôt l'application de la physique et de la chimie pour expliquer des généralisations issues de l'histoire naturelle »¹¹⁷.

Popper écrit, à plusieurs reprises au cours des années 1960-1970, sur la proximité entre sa théorie de la connaissance et la théorie de l'évolution par sélection naturelle. La comparaison repose sur le fait que, pour Popper, l'expérience élimine les théories en réfutant celles qui n'y sont pas adéquates comme le milieu élimine les individus non adaptés. Mais, de même que le milieu n'est pas à l'origine des mutations, l'expérience n'est pas — *via* l'induction — à l'origine des innovations théoriques¹¹⁸.

Cependant, tout en affirmant que le darwinisme représente bien sa

¹¹⁵SMART, *Philosophy and Scientific Realism*, p. 53.

¹¹⁶SMART, *Philosophy and Scientific Realism*, p. 52.

¹¹⁷SMART, *Philosophy and Scientific Realism*, p. 60.

¹¹⁸Karl POPPER, *Unended Quest : An Intellectual Autobiography*, 2^e éd., Londres, Routledge, 1976, p. 195.

conception de la méthode scientifique, Popper affirme aussi que ce n'est pas une théorie scientifique testable, mais un « programme de recherche métaphysique »¹¹⁹. Dans son autobiographie intellectuelle *Unended Quest* (1976), au paragraphe 37, il revient sur les arguments en faveur de cette thèse :

Le Darwinisme ne prédit pas réellement l'évolution de la diversité [des formes vivantes]. Il ne peut donc réellement l'expliquer¹²⁰. Au mieux, il peut prédire l'évolution de la diversité « sous certaines conditions favorables ». Mais il est quasiment impossible de décrire en termes généraux quelles sont ces conditions favorables – sinon de dire qu'en leur présence, une diversité de formes émergera¹²¹.

En effet, Popper interprète la loi fondamentale de la théorie de l'évolution par cette formule : « seules les plus adaptés survivent et laissent des descendants ». Mais il comprend la définition d'adaptation ainsi : « est adapté un organisme qui survit et laisse des descendants », définition qui rend la loi fondamentale de la théorie de l'évolution tautologique. Ces considérations amènent Popper à considérer que les énoncés de la théorie de l'évolution par sélection naturelle de Darwin sont non réfutables et métaphysiques. Ce n'est pas, sous la plume de Popper, une condamnation sans équivoque de cette théorie : elle peut toujours servir de cadre logique dans lequel se développent des théories réellement réfutables. Mais ce constat d'incapacité à réaliser des prédictions réfutables a pour conséquence que la théorie de Darwin n'est pas scientifique, constat que vise très directement M. Williams lorsqu'elle écrit en 1973 un article intitulé « Falsifiable predictions of evolutionary theory ».

Cette controverse se clôt lorsque Popper revient, en 1978, sur la thèse de la non-réfutabilité de la théorie de la sélection naturelle et admet sa scientificité¹²². L'une des raisons avancées par Popper pour justifier son

¹¹⁹POPPER, *Unended Quest*, p. 195.

¹²⁰Popper a développé, indépendamment de Hempel, la même thèse de l'identité structurale entre prédiction et explication.

¹²¹POPPER, *Unended Quest*, p. 199.

¹²²Karl POPPER, "Natural Selection and the Emergence of Mind", *Dialectica* 32 (1978), p. 339–355, p. 346.

revirement est l'une des prédictions mentionnées par M. Williams, selon laquelle la répartition des allèles dans un groupe n'est pas celle qui serait imputable à la seule dérive génétique.

Annexe au chapitre 3 : éléments de cosmologie

Dans cette annexe, je présente la démonstration des résultats utilisés dans les chapitres sur l'histoire de la cosmologie, en m'appuyant principalement sur les exposés de G. Ellis¹²³ et A. Liddle¹²⁴.

Des équations d'Einstein à l'équation de Friedmann-Lemaître

La cosmologie relativiste est l'application, à l'ensemble de l'Univers, des équations d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}r + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (9.1)$$

où $R_{\mu\nu}$ est le tenseur de Ricci, r est la courbure scalaire, $g_{\mu\nu}$ est le tenseur métrique, κ est la constante d'Einstein ($\frac{8\pi G}{c^4}$), $T_{\mu\nu}$ est le tenseur énergie-impulsion, et Λ est la **constante cosmologique**.

Les modèles standards d'Univers résolvent ces équations en posant un principe cosmologique selon lequel l'Univers est statistiquement homogène et isotrope, c'est-à-dire qu'il présente le même aspect dans toutes ses régions et dans toutes les directions. L'article d'Einstein de 1917 fait cette supposition similaire mais on utilise aujourd'hui les géométries de Robertson-Walker. Dans le cadre de ces géométries on peut définir un

¹²³ELLIS, "Issues in the philosophy of cosmology".

¹²⁴Andrew LIDDLE, *An Introduction to Modern Cosmology*, 2^e éd., Chichester, Wiley, 2009.

temps cosmologique pour tous les observateurs et on peut choisir des coordonnées comobiles qui peuvent être choisies telles que :

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t)d\sigma^2 \quad (9.2)$$

où $R(t)$ est le rayon de l'univers ou facteur d'échelle (en fonction du temps).

La condition d'homogénéité impose que $d\sigma^2$ pour un instant t donné sont des surfaces homogènes de courbure constante, c'est-à-dire des espaces tridimensionnels de courbure :

$$K = \frac{k}{R^2(t)} \quad (9.3)$$

où k est le signe de courbure K . Si $k = 0$ l'espace est dit euclidien et la somme des angles d'un triangle vaut 180° , si $k > 0$ (resp. $k < 0$) l'espace est dit sphérique (resp. hyperbolique) et la somme des angles d'un triangles est supérieur (resp. inférieur) à 180° .

On détermine l'évolution de la métrique en y appliquant les équations d'Einstein qui montrent l'effet de la matière sur la courbure de l'espace-temps. La condition d'isotropie implique que la masse de l'Univers peut être considérée comme un fluide et donc que le tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$ prend la forme d'un fluide parfait, c'est-à-dire qui se détend sans échange de chaleur :

$$\dot{\rho} + (\rho(t) + \frac{p(t)}{c^2}) \cdot \frac{3\dot{R}}{R(t)} = 0 \quad (9.4)$$

où $\rho(t)$ est la densité d'énergie de l'Univers, $\dot{\rho}$ sa dérivée par rapport au temps, $p(t)$ la pression de l'Univers et c la vitesse de la lumière.

Le facteur d'échelle $R(t)$ obéit ainsi à la fonction :

$$\frac{3\ddot{R}^2}{R^2} = -\frac{1}{2}\kappa(\rho + \frac{3p}{c^2}) + \Lambda \quad (9.5)$$

Les équations (9.4) et (9.5) sont celles dérivées par Friedmann¹²⁵ et si on admet que $\dot{R} \neq 0$ (c'est-à-dire que l'Univers a un rayon qui évolue dans

¹²⁵FRIEDMANN, "Über die Krümmung des Raumes".

le temps), alors on obtient l'équation de Friedmann-Lemaître dérivée aussi par Lemaître¹²⁶ :

$$\frac{\dot{R}}{R} = \frac{\kappa\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3} - \frac{kc^2}{R^2} \quad (9.6)$$

Cette équation différentielle permet de relier les quatre principaux paramètres des modèles cosmologiques :

- $H(t) = \frac{\dot{R}}{R}$: le taux d'expansion de l'Univers. H_0 , le taux d'expansion d'Univers à l'instant t_0 actuel, est la constante de Hubble (exprimée en $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$).
- Λ est la constante cosmologique.
- ρ est la densité de l'Univers.
- k est le signe de la courbure de l'Univers.

L'ajustement de ces différents paramètres mènent à différents modèles d'Univers et donc différentes prédictions cosmologiques. Dans les sections qui suivent, nous allons montrer comment dériver les prédictions qui sont étudiées dans cette thèse à partir de l'équation de Friedmann-Lemaître.

L'effet de Sitter

De Sitter n'a pas dérivé sa prédiction de l'équation de Friedmann-Lemaître, parce que son modèle d'Univers était statique ($\dot{R} = 0$). Mais cette équation permet de montrer simplement pourquoi dans un modèle d'Univers de densité nulle mais avec une constante cosmologique on observe un mouvement de récession des galaxies. En effet, si $\rho = 0$, alors on tire de (9.4) :

$$\frac{\dot{R}}{R(t)} = \frac{c^2}{3.p(t)}$$
$$H(t) = \frac{c^2}{3.p(t)}$$

¹²⁶LEMAÎTRE, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques".

Puisque c et $p(t)$ sont tous deux positifs, $H(t)$ est supérieur à zéro, ce qui signifie que le taux d'expansion de l'Univers augmente avec le temps. On observe donc un effet de récession des galaxies.

La prédiction de Lemaître

Historiquement, Lemaître est le premier à avoir prédit la relation entre la distance des galaxies et leur récession à partir d'un modèle d'Univers dynamique¹²⁷, c'est-à-dire à partir de (9.6) :

$$\text{si } \frac{\kappa\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3} - \frac{kc^2}{R^2} = \text{constante}$$

$$\text{alors } \frac{\dot{R}}{R} = \text{constante}$$

$$\text{or } \frac{\dot{R}}{R} = H(t) = \frac{d}{v} \text{ (où } d \text{ est la distance de la galaxie et } v \text{ sa vitesse radiale)}$$

donc $d \propto v$.

C'est à la simplicité de cette prédiction que fait référence de Sitter lorsqu'il fait l'éloge de la « solution de Lemaître » au problème de la récession apparente des galaxies. Cependant, Hubble n'accepta jamais cette interprétation de la relation qui porte son nom.

Le modèle Einstein-de Sitter

Le modèle Einstein-de Sitter fut proposé en 1932 par les deux savants¹²⁸ comme modèle d'Univers en expansion le plus simple possible, c'est-à-dire dans lequel la courbure et la constante cosmologique sont nulles ($k = 0$ et $\Lambda = 0$). On obtient donc, à partir de (9.6) :

$$H^2 = \frac{\Lambda}{3} + \frac{\kappa\rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2}$$

$$H^2 = \frac{\kappa\rho}{3}$$

Puisque κ et ρ sont tout deux positifs, l'Univers d'Einstein-de Sitter

¹²⁷LEMAÎTRE, "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques".

¹²⁸EINSTEIN et DE SITTER, "On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe".

est en expansion. Il permet aussi de définir la notion de *densité critique* :

$$\rho_c = \frac{3H^2}{\kappa}$$

Cette densité est celle que doit avoir un Univers pour que sa courbure soit nulle et elle reste une des notions les plus utilisées aujourd'hui en cosmologie.

Ainsi, ce modèle d'Univers montre non seulement que la notion d'expansion d'Univers s'est rapidement diffusée dans la communauté des scientifiques traitant de questions cosmologiques, mais aussi que certaines des notions fondamentales de la cosmologie moderne ont commencé, à cette époque, à se stabiliser.

Annexe au chapitre 4 : la théorie de l'état stationnaire

La théorie de l'état stationnaire est une théorie aujourd'hui considérée comme réfutée et peu étudiée, tant d'un point philosophique que scientifique. Cependant, sa formulation, ses développements, ses succès et même, voire surtout, ses échecs prédictifs sont d'un grand intérêt pour la philosophie comme pour l'histoire des sciences. Cette annexe vise à exposer son histoire plus en détail que dans le corps de la thèse.

Les deux formulations de la théorie de l'état stationnaire

La théorie de l'état stationnaire présente une particularité qui en fait un cas original en histoire des sciences. Elle fut présentée, dès sa première formulation, sous deux versions différentes : celle de Hoyle d'une part, celle de Bondi et Gold d'autre part.

La version de Hoyle et ses prédictions

L'équation de champ de la relativité générale s'écrit :

$$R_{mn} - \frac{1}{2}g_{mn}R - \Lambda g_{mn} = -\kappa T_{mn} \quad (9.7)$$

où R_{mn} est le tenseur de courbure de Ricci, g_{mn} un tenseur métrique, R une constante dérivée de R_{mn} , Λ la constante cosmologique, κ une constante égale à $8\pi G/c^2$ et T_{mn} le tenseur d'énergie-impulsion qui re-

présentent différentes sources d'énergie et d'impulsion.

La proposition de Hoyle consiste à se passer de la constante cosmologique et d'ajouter un *tenseur de création* C_{mn} à l'équation d'Einstein.

$$R_{mn} - \frac{1}{2}g_{mn}R + C_{mn} = -\kappa T_{mn} \quad (9.8)$$

Tel qu'il est défini, ce tenseur de création implique qu'une solution de cette équation est une métrique de De Sitter¹²⁹ de la forme

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t)(dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (9.9)$$

où ds est la distance invariante entre deux points de l'espace-temps et $R(t)$ le facteur d'échelle.

Une telle métrique équivaut à un espace de courbure nulle et dont l'expansion a un taux constant, c'est-à-dire : $R(t) \propto \exp H(t)$

De plus l'équation (9.8) permet de poser le système d'équation suivant :

$$2RR'' + R'^2 - 3cRR'/a = 0 \quad (9.10)$$

$$3R'^2 = \kappa\rho c^4 R^2 \quad (9.11)$$

où a est une constante.

Si l'on choisit $R = 1$ pour $t = 0$, on obtient de ce système :

$$R(t) = \exp ct/a$$

$$R(t) = \exp \sqrt{\frac{\rho\kappa}{3}} ct$$

Donc :

$$a^2 = \frac{3}{\rho\kappa} \quad (9.12)$$

On voit dans cette formule que la densité est indépendante du temps. De plus, on peut facilement en tirer que « la masse totale de la matière

¹²⁹Il ne faut pas confondre la métrique de de Sitter exposée ici avec le modèle d'univers dit Einstein-de Sitter dans lequel la courbure et Λ sont nuls et $H(t)$ tend vers zéro avec t .

à l'intérieur de l'univers observable est indépendante de t et donnée par $4\pi a/\kappa c^2 \gg^{130}$.

Hoyle conclut ainsi que l'ajout d'un tenseur de création de matière aux équations de la relativité générale amène à passer d'un principe cosmologique restreint à un principe cosmologique « au sens large » :

Selon le principe cosmologique restreint, la distribution de matière et d'énergie relative à un observateur attaché à une particule particulière est identique à la distribution relative à un observateur attaché à n'importe quelle autre particule, si la comparaison a lieu pour la même valeur de temps. Cette dernière restriction affaiblit l'équivalence entre observateurs. Quand le principe cosmologique est utilisé dans son sens large, cette restriction est abandonnée, et l'équivalence s'appliquerait même si les deux observateurs procèdent à leur mesures en des temps différents¹³¹.

C'est parce que le modèle d'univers en état stationnaire satisfait ce principe cosmologique élargi qu'il échappe au principal problème des modèles d'univers en évolution, le « problème d'échelle temporaire » (voir ci-dessus).

La théorie de l'état stationnaire de Hoyle se construit donc en modifiant la théorie de la relativité générale, tout en acceptant la description de l'univers en termes de tenseurs et de champs, ce qui a eu des conséquences notables dans les années 1960. En revanche, l'article de Hoyle ne mentionne quasiment aucune conséquence testable de sa théorie. Certes, il énumère certaines conséquences observables en principe, mais difficilement réalisables concrètement, comme la valeur du rayon de l'univers observable, $1,8 \cdot 10^{25} m$ et de la masse de cet univers observable, $1,2 \cdot 10^{52} kg$. La seule valeur prédite par la théorie de Hoyle qui ait été effectivement mesurée est celle de la densité ρ qu'il estime à $5 \cdot 10^{-28} g \cdot cm^3$, alors que l'estimation de Hubble pour la matière lumineuse était de $5 \cdot 10^{-31} g \cdot cm^3$. Hoyle échappe à cette potentielle réfutation en interprétant cette diffé-

¹³⁰HOYLE, "A new model for the expanding universe", p. 378.

¹³¹HOYLE, "A new model for the expanding universe", p. 372.

rence comme le signe qu'environ une partie sur mille du milieu intergalactique est, à présent, sous une forme condensée.

La théorie de Bondi et Gold

L'article de Bondi et Gold formule une version formellement très différente de la théorie de l'état stationnaire. Si l'article de Hoyle compte 48 équations en 10 pages, celui de Bondi et Gold n'en compte que 7 sur 18 pages.

En effet, la théorie de Bondi et Gold n'est pas formulée comme une extension des équations d'Einstein, mais comme une série de déduction à partir de ce qu'ils nomment le *principe cosmologique parfait* :

Notre travail n'est donc pas défini uniquement par le principe cosmologique usuel, mais par une extension de celui-ci qui est obtenu en supposant que l'univers n'est pas seulement homogène mais aussi inchangé à grande échelle. Cette combinaison du principe cosmologique et du postulat stationnaire, nous l'appelons le *principe cosmologique parfait* et tous nos arguments seront basés dessus¹³².

Ce principe est équivalent, dans son contenu, au principe cosmologique élargi de Hoyle. Mais alors que celui-ci était démontré à partir des équations d'Einstein modifiées, le principe cosmologique parfait est justifié par sa valeur *épistémologique* : sans lui nous n'avons aucune raison de penser que les lois de la physique que nous pouvons expérimenter en laboratoire puissent être appliquées à l'univers.

En effet, d'après Bondi et Gold, si l'aspect de l'univers est soumis à des changements importants, nous n'avons aucune assurance que les lois de la physique ne changent pas aussi. Ainsi, c'est parce qu'il permet d'appliquer les lois à l'univers, et ainsi de le connaître, que le principe cosmologique parfait doit être accepté :

Nous ne prétendons pas que ce principe est vrai, mais nous disons que s'il ne tient pas, le choix de chacun de la variabilité

¹³²BONDI et GOLD, "The steady-state theory of the expanding universe", p. 254.

des lois de la physique devient si large, que la cosmologie n'est plus une science. On ne peut donc plus utiliser la physique de laboratoire sans utiliser un principe arbitraire pour les extrapoler¹³³.

Cette justification du principe cosmologique parfait amène Bondi et Gold à remettre en question d'autres principes physiques bien établis, comme le principe de conservation de la matière. Ce genre de démarche leur a été fréquemment reproché par la suite, mais pour rendre justice à Bondi et Gold, il faut remarquer que s'ils acceptent de remettre en question des extrapolations théoriques de principes admis dans d'autres branches de la physique, ils acceptent dès 1948 la possibilité qu'une observation directe puisse réfuter le principe cosmologique parfait (sans que l'on comprenne bien si cela remettrait en question toute possibilité de faire une cosmologie scientifique) :

Nous considérons que ce principe a une telle importance fondamentale, que nous pourrions, si nécessaire, rejeter des extrapolations théoriques de résultats expérimentaux s'ils entrent en conflit avec le principe cosmologique parfait, même si les théories concernées font consensus. Bien sûr, nous n'éliminerons jamais aucune preuve expérimentale ou observationnelle directe¹³⁴.

Il est étonnant de voir que d'une théorie exposée de manière si peu quantitative, Bondi et Gold réussissent à tirer de nombreuses conséquences théoriques et observationnelles. En effet, dans la suite de l'article, Bondi et Gold arrivent à montrer que :

- L'univers doit être en expansion : si l'univers est statique et satisfait le principe cosmologique parfait il aurait déjà atteint l'équilibre thermodynamique. Or ce n'est pas le cas, et le principe cosmologique parfait ne permet que deux types de mouvement de l'univers : l'expansion avec des vitesses proportionnelles à la distance et son

¹³³BONDI et GOLD, "The steady-state theory of the expanding universe", p. 255.

¹³⁴BONDI et GOLD, "The steady-state theory of the expanding universe", p. 255.

inverse, la contraction. Or dans un univers en contraction il y aurait plus de radiation par rapport à la matière que dans un univers statique, donc l'univers est en expansion.

- La courbure de l'univers est nulle : le principe cosmologique parfait implique que le taux de création de matière soit constant. Or le taux de création est proportionnel au rapport k/R^2 (où k est la courbure globale de l'espace-temps). Or, puisque $R = R(t)$, la seule manière que $k/R(t)^2$ soit constant est que $k = 0$.
- Les galaxies lointaines et proches ne doivent pas présenter de différences systématiques d'âges : dans un modèle d'univers en évolution, les galaxies lointaines doivent aussi être en moyenne plus jeunes, tandis que ce n'est pas le cas dans un modèle d'univers en état stationnaire.

L'article de Bondi et Gold s'écarte donc aussi de celui de Hoyle sur les conséquences observables qu'ils tirent de leur théorie de l'état stationnaire. Cependant, toutes ces prédictions étant dérivées du principe cosmologique parfait, qui est un lemme dans la version de Hoyle, on peut aussi les dériver à partir de la version de Hoyle de la théorie de l'état stationnaire. C'est pourquoi les théories de Hoyle et de Bondi et Gold sont deux formulations de la même théories, différentes sur certains points théoriques mais équivalentes au point de vue empirique.

Leur principale différence consiste donc dans leur hypothèse fondamentale et leur compatibilité de cette théorie avec la relativité générale. Dans la formulation de Hoyle, les équations de champ d'Einstein sont juste modifiées, tandis qu'elles n'apparaissent pas dans la formulation de Bondi et Gold. Ainsi, non seulement la version de Hoyle était plus susceptible d'être compatible avec la relativité générales, mais en outre elle pouvait résister à un abandon du principe cosmologique élargi en ajustant la valeur du tenseur de création C .

Le cas de la théorie de l'état stationnaire illustre donc une caractéristique importante des situations de sous-détermination empirique qui n'a pas encore été remarquée : deux formulations théoriques empiriquement équivalentes n'offrent pas forcément les mêmes perspectives d'évolution

en cas de réfutation par les données, ce qui peut expliquer comment on peut trancher entre elles.

Les tests de la théorie de l'état stationnaire

La manière dont la théorie de l'état stationnaire a été testée dans les années 1950-1960 montre comment une théorie qui s'est révélée par la suite fautive a pu permettre le développement de la capacité prédictive de la science à laquelle elle appartient. En effet, de nombreuses connexions entre les théories cosmologiques et les observations ont été découvertes par les partisans de la théorie de l'état stationnaire dans l'optique de montrer que leur théorie était plus testable que ses rivales.

Le paramètre de décélération de l'Univers

La loi de Hubble, pour de faibles redshifts, peut s'exprimer ainsi :

$$cz = H_0 \cdot d \quad (9.13)$$

où H_0 est la valeur actuelle du paramètre de Hubble. Mais si H n'est pas constant dans le temps, alors :

$$cz = H_0 \cdot d + a \cdot d^2 \quad (9.14)$$

On peut exprimer l'équation (9.14) à partir de la relation entre magnitude apparente m et absolue M $m - M = 5 \log d + 5$:

$$m = M - 5 \log H_0 + 5 \log(cz) + \text{constante} + 1,086(1 - q_0)z \quad (9.15)$$

Dans cette équation apparaît ce que l'on appelle le *paramètre de décélération* représentant la diminution du taux de l'expansion au cours du temps :

$$q_0 = -R'' \cdot R / (R')^2 \quad (9.16)$$

où R' indique la dérivée du facteur d'échelle R par rapport au temps.

L'idée d'utiliser ce paramètre pour tester les différents modèles cosmo-

logiques trouve son origine dans un travail commun de Hoyle et Sandage publié en 1956¹³⁵. En effet, pour la théorie de l'état stationnaire, le taux d'expansion de l'univers reste constant. Cela implique donc :

$$q_0 = -1$$

Un test expérimental de la théorie de l'état stationnaire est donc simple, en principe, à réaliser. Il faut sélectionner des galaxies d'une certaine magnitude absolue M et ensuite mesurer leur magnitude relative m pour estimer leur distance, et la comparer à leur redshift z (on utilise plutôt $\log(cz)$). Comme on le voit sur la figure 9.10, seule la théorie de l'état stationnaire fait une prédiction précise : si $q_0 = 1$, alors la courbe doit être linéaire.

Les différents modèles d'univers en évolution, eux, peuvent s'ajuster aux différents résultats expérimentaux, puisqu'ils ne sont pas obligés de supposer un taux expansion constant. L'intérêt d'essayer d'observer et de mesurer le paramètre d'accélération, dans les années 1950, était donc surtout d'essayer de fournir un test à la théorie de l'état stationnaire.

Le paramètre de décélération est toujours un outil important de la cosmologie observationnelle, même après la disparition de la théorie de l'état stationnaire, parce qu'il permet d'ajuster la loi de Hubble pour les objets lointains à grand redshift.

La radioastronomie

L'importance de la théorie de l'état stationnaire dans le développement de la capacité prédictive de la cosmologie se fait encore plus sentir dans le domaine de la radioastronomie, discipline naissant dans les années 1950 qui trouva dans les tests de la théorie de l'état stationnaire sa première application à des questions cosmologiques.

Le premier contact des cosmologistes avec la radioastronomie a lieu dès 1951, lors d'une controverse entre Gold et Ryle sur la position des sources radio : pour Gold elles sont en grande partie extragalactiques,

¹³⁵HOYLE et SANDAGE, "The second-order term in the redshift-magnitude relation".

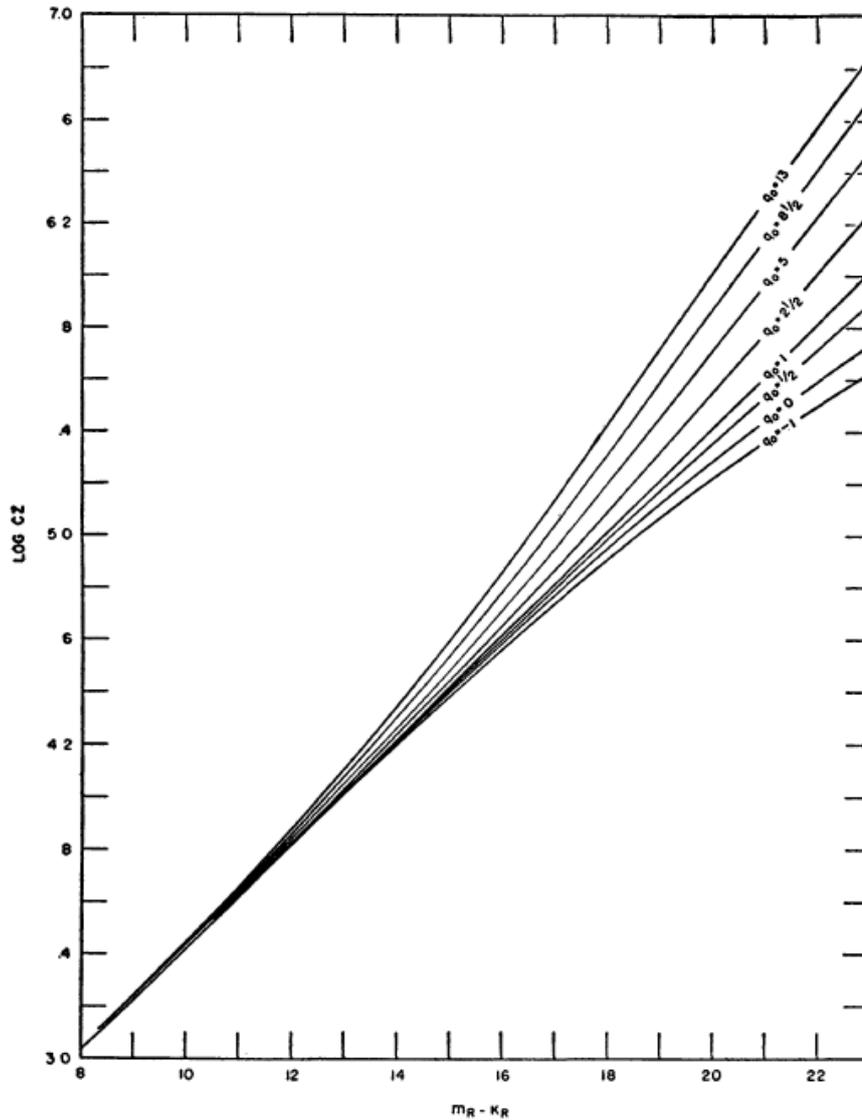


FIGURE 9.10 : Différentes prédictions de la valeur du paramètre de décélération des modèles d'univers, avec la magnitude en abscisses et $\log cz$ en ordonnées. La seule prédiction de la théorie de l'état stationnaire est la droite linéaire. Les autres courbes correspondent à différentes manières d'ajuster les modèles d'Univers en évolution. Source : Allan SANDAGE, "The Ability of the 200-INCH Telescope to Discriminate Between Selected World Models.", *The Astrophysical Journal* 133 (1961), p. 355–371.

tandis qu'elles sont pour Ryle intragalactiques¹³⁶. On n'arrive pas, à cette date, à avoir une contrepartie optique des sources radio : les premières ont lieu l'année suivante.

Ryle, lors de la séance du 12 octobre 1951 de la *Royal Astronomical Society* affirme ainsi : « Je pense que les théoriciens ont mal compris les données expérimentales ». Cette phrase vise directement Gold, avec qui il avait déjà eu des discussions animées sur les émissions solaires en radio¹³⁷. D'après l'astronome et historien de la radioastronomie Woodruff Sullivan, Ryle n'aurait admis que la source radio Cyg A serait extragalactique qu'en septembre 1952, lors d'un colloque de l'Union Astronomique Internationale, après des discussions avec Baade, qui avait identifié la source optique comme une collision de galaxies à $30 Mpc$ ¹³⁸. Il aurait ensuite progressivement admis que la plupart des sources étaient extragalactiques et très lointaines, admettant ainsi l'intérêt cosmologique des observations radioastronomiques : « il est agréable de penser que les cosmologistes pourraient, un jour, perdre leur complète liberté de choix de conditions au-delà de la limite optique »¹³⁹.

Dans les années 1950 et 1960, les observatoires de radioastronomie cherchent à établir un catalogue des sources radios. Une fois qu'il a été admis, notamment par Ryle, que les sources radio étaient en majorité extragalactiques (et probablement très éloignées), deux des trois surveys de Cambridge effectués durant ces années (le 1C, le 2C et le 3C) ont été utilisés pour tester la théorie de l'état stationnaire. En effet, conformément à la prédiction de Bondi et Gold que l'on trouve dans leur article de 1948 (voir ci-dessus), selon la théorie de l'état stationnaire on devrait trouver une distribution isotropique des sources radios. Il est à cette époque impossible de mesurer la distance des sources avec leur redshift. Cependant, il est possible de l'estimer à partir de la puissance de la source. La pro-

¹³⁶Woodruff SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 309–330, p. 315.

¹³⁷SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", p. 316.

¹³⁸SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", p. 316.

¹³⁹SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", p. 321.

cédure de comptage des sources radios employée par les radioastronomes de l'époque est consisté à tracer un diagramme connu sous le nom de « $\log S - \log N$ ».

Soit S un puissance donnée en $W.m^{-2}.s$ et N un certain nombre de sources de puissance $\geq S$.

Si les sources sont distribuées de manière uniforme dans un espace euclidien, alors

$$N \propto S^{-3/2} \quad (9.17)$$

$$\log N = \text{constante} - 1,5 \log S \quad (9.18)$$

Or la théorie de l'état stationnaire suppose précisément des sources ainsi distribuées. Il suffit donc de tracer le diagramme avec $\log N$ en ordonnée et $\log S$ en abscisse et de regarder si la pente de la courbe vaut -1.5 (voir figure 9.11). De tels diagrammes avaient déjà été tracés pour le 1C, afin de discuter de la nature intra ou extragalactique des sources radio¹⁴⁰. Mais comme pour la mesure du paramètre de décélération tentée par Sandage, on peut fortement douter que ces mesures auraient été aussi discutées et diffusées si elles n'avaient pas eu un rôle à jouer en cosmologie. Et à nouveau, c'est la théorie de l'état stationnaire qui est directement concernée par ces mesures, car elle réalise à leur sujet une prédiction risquée là où les modèles d'univers en évolution peuvent très bien être ajustés pour d'adapter aux différents résultats expérimentaux.

Les résultats des trois surveys sont les suivants :

- **1950** : 1C, 50 sources. Il n'est pas utilisé (ni utilisable) pour tester les théories en cosmologie.
- **1956** : 2C, 1936 sources, dont plus de 1900 sont extragalactiques. Ce survey donne une pente à $\log N - \log S = -3$, mais il est fortement débattu, notamment par Gold qui va directement voir l'équipe de Ryle au laboratoire Cavendish (à Cambridge). Il fut ensuite recalibré sur le survey australien, dont les résultats « tombent sur une ligne légèrement irrégulière de pente $-1,5$ »¹⁴¹. La prédiction de

¹⁴⁰En effet, si les sources sont intragalactiques, elles devraient être plus fréquentes dans le plan de la Voie lactée, et ne pas être réparties de manière isotrope.

¹⁴¹SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin

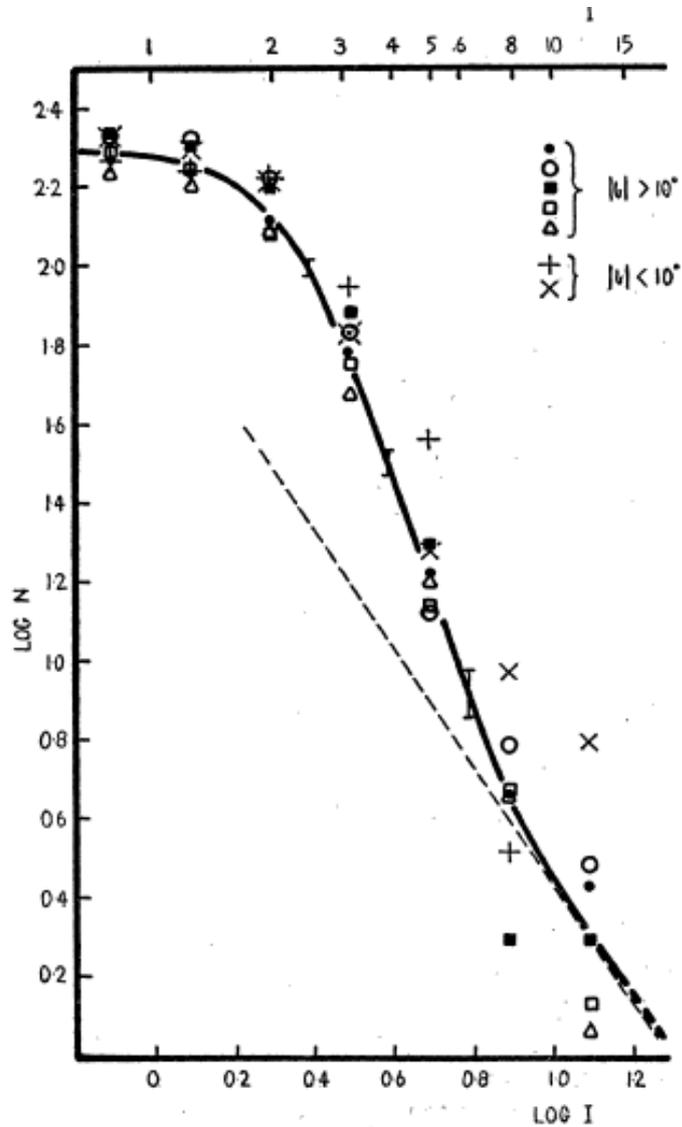


FIGURE 9.11 : Illustration de la méthode $\log N - \log S$ avec le résultat du 2C. $\log I$ (équivalent à $\log S$ en abscisses, et $\log N$ en ordonnées. La pente prédite par la théorie de l'état stationnaire est tracée en pointillés. Source : Woodruff SULLIVAN, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 309-330.

la théorie de l'état stationnaire n'était donc pas réfutée.

- **1961** : 3C, donne une pente à $-1,8 \pm 0.12$, confirmée par Sydney et Manchester. Il est présenté le 10 février 1961 à la Royal Astronomical Society. La prédiction de la théorie de l'état stationnaire ne peut, sans ajustement, s'accommoder de ce résultat.

Ainsi, la prédiction tirée de la théorie de l'état stationnaire a été réfutée par les surveys radioastronomiques. Mais elle a permis d'augmenter la précision et les dimensions de ces surveys et a montré que la radioastronomie pouvait être appliquée aux problèmes cosmologiques.

Ryle's 2C survey", p. 326.

Annexe au chapitre 5 : les tests de la théorie de l'inflation

La théorie de l'inflation a d'abord été proposée pour répondre à des incohérences du modèle standard de la cosmologie, et fut ensuite appliquée à d'autres problèmes. Dans cette annexe on montre qu'elle illustre le cas où une théorie est introduite comme hypothèse auxiliaire d'une autre théorie pour la sauver de la réfutation, mais gagne par la suite une capacité prédictive qui lui est propre.

Les énigmes du modèle standard

L'énigme de l'horizon

Le fond diffus cosmologique est la première lumière de l'Univers : il a été émis au moment du découplage matière/rayonnement, $\simeq 380\,000$ ans après le big bang.

Si l'on choisit arbitrairement un point du fond diffus cosmologique, alors son horizon causal est une sphère de rayon $380\,000$ années-lumière dans un référentiel co-mobile. Il n'a pas eu le temps d'être affecté par des points au-delà de cet horizon.

On peut facilement démontrer à partir de là que certains points du fond diffus cosmologique n'ont pas pu être en contact causal et ont pourtant une température très proche. Il suffit de considérer des points du fond diffus cosmologique aux antipodes sur la sphère céleste : leur premier contact causal correspond au moment où ils sont observés par un observateur terrestre (voir figure 9.12).

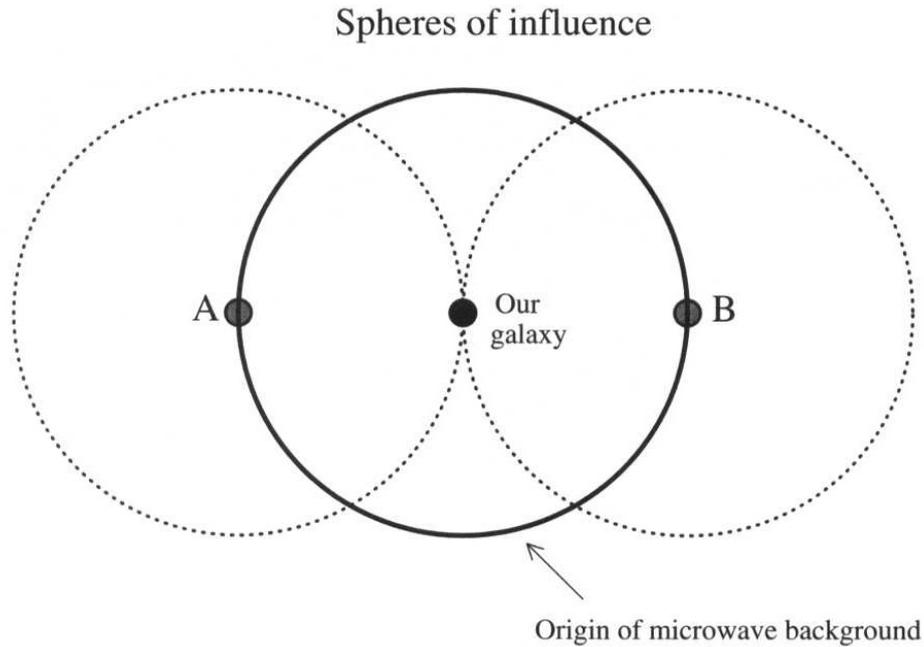


FIGURE 9.12 : Illustration de l'énigme de l'horizon : on reçoit le rayonnement de deux points A et B situés à l'opposé l'un de l'autre. Ces points sont séparés de telle manière qu'ils n'ont pas pu interagir depuis le big bang. Les cercles en pointillé indiquent leur horizon causal actuel. Il leur était donc encore moins possible d'avoir interagi entre la période du big bang et l'instant du découplage matière/rayonnement où le fond diffus cosmologique a été émis. Il est donc très surprenant que ces deux points A et B du fond diffus cosmologique aient une température si proche. Source : Source : Andrew LIDDLE, *An Introduction to Modern Cosmology*, 2^e éd., Chichester, Wiley, 2009, p. 110.

L'énigme de la courbure nulle

On peut réécrire l'équation de Friedmann-Lemaître (9.6) ainsi, si l'on suppose que $\Lambda = 0$:

$$|\Omega(t) - 1| = \frac{|k|}{R^2 H^2} \quad (9.19)$$

Où $\Omega(t)$ est la densité critique de l'univers, c'est-à-dire le seuil au-delà duquel la densité de l'univers est telle que cet univers de courbure positive et donc clos (toujours si $\Lambda = 0$).

Or $R^2 H^2$ est proportionnel à t^{-1} dans la période où la densité de radiation domine la densité totale de l'Univers, et à $t^{-2/3}$ dans la période où c'est la densité de matière qui domine. Ainsi, durant les deux périodes, $|\Omega(t) - 1|$ augmente avec t et donc s'éloigne de 0. Or la courbure n'est nulle que si $|\Omega(t) - 1| = 0$

Il est donc très étonnant que 380 000 ans après le big bang la courbure de l'Univers soit toujours très proche de zéro.

La théorie de l'inflation et les énigmes du modèle standard

Les fondements de la théorie de l'inflation sont posés par A. Starobinsky¹⁴², mais c'est A. Guth¹⁴³ qui montra que cette phase d'inflation exponentielle permet de résoudre le problème de l'horizon et de la courbure.

Lors de la phase d'inflation, la densité et la courbure de l'Univers sont des paramètres négligeables. On peut donc simplifier l'équation de Friedman-Lemaître (9.6) ainsi :

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\Lambda}{3} \quad (9.20)$$

¹⁴²STAROBINSKY, "A new type of isotropic cosmological models without singularity".

¹⁴³GUTH, "Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems".

On tire de (9.20) la relation suivante :

$$R' = \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} R$$

Comme Λ est une constante, on a :

$$R(t) = \exp \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t \quad (9.21)$$

Si l'on réécrit (9.19) en tenant compte de (9.21), on obtient :

$$|\Omega(t) - 1| \propto \exp -\sqrt{\frac{4\Lambda}{3}} t \quad (9.22)$$

Or, $\exp -\sqrt{\frac{4\Lambda}{3}} t$ tend rapidement vers 0 lorsque t augmente, donc durant la phase d'inflation la courbure de l'Univers tend vers zéro. Cela résout le problème de la courbure nulle.

La phase d'inflation résout aussi le problème de l'horizon puisque l'expansion exponentielle éloigne au-delà de leur horizon causal respectif des points qui étaient auparavant en équilibre thermique.

La théorie de l'inflation et la formation des structures

Cependant, ce n'est pas en résolvant les énigmes du modèle standard que l'inflation a prouvé qu'elle était plus qu'une théorie *ad hoc*, mais en fournissant une théorie de l'origine des grandes structures (étoiles, galaxies, amas de galaxies). Les légères anisotropies du fond diffus cosmologique sont des variations de densité qui, sous l'effet de la gravitation, ont accentué les contrastes de densité jusqu'à former des masses suffisantes pour former des étoiles, des galaxies, etc. La théorie de l'inflation permet de prédire ces anisotropies à partir du scénario de l'inflation.

À partir de la mission COBE en 1989, on a pu disposer de cartes des anisotropies du fond diffus cosmologique (voir figure 9.13).

Comment exploiter ces données ? Pour contraindre les modèles cos-

COBE-DMR Map of CMB Anisotropy

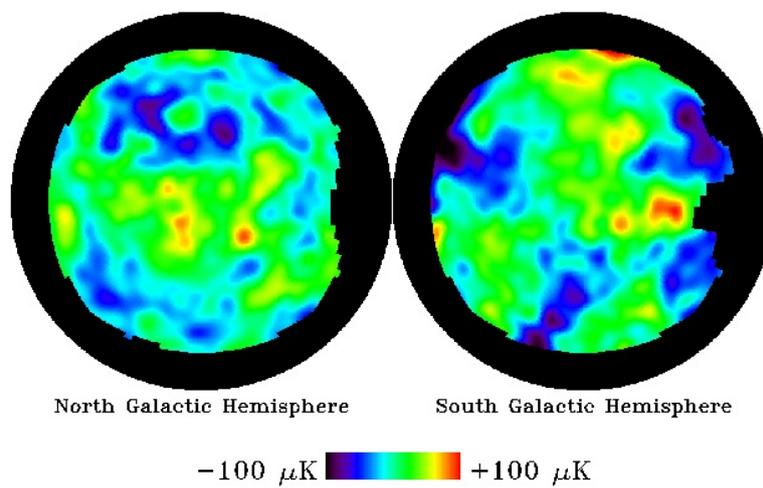


FIGURE 9.13 : La carte des anisotropies, entre $-100 \mu\text{K}$ et $+100 \mu\text{K}$ autour de $2,7\text{K}$, mesurées par l'instrument DMR de COBE. Les régions rouges indiquent les régions de sur-densité qui à l'origine des structures galactiques. Source : NASA.

mologiques, on mesure la température $T(\theta, \Phi)$ dans une direction donnée et on définit la température adimensionnelle $\frac{\Delta T}{T}$:

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \frac{T(\theta, \phi) - \bar{T}}{\bar{T}}$$

où \bar{T} est la température moyenne. On procède ensuite à une expression en harmonique sphérique $Y_m^l(\theta, \phi)$ (l'équivalent d'une série de Fourier pour une sphère) :

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_m^l(\theta, \phi)$$

Les coefficients a_{lm} peuvent être considérés comme exprimant la taille des irrégularités à différentes échelles angulaires. On s'intéresse aux propriétés statistiques de ces coefficients, que l'on quantifie par le spectre de puissance angulaire C_l défini comme la moyenne du carré des parties réelles des coefficients :

$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$$

Pour un théoricien, cela représente une moyenne sur tous les univers possibles qui auraient pu apparaître par hasard, une fois que le modèle cosmologique a été fixé. Cela peut aussi être vu comme une moyenne sur tous les observateurs possibles dans notre univers ; il faut se souvenir que l'on ne perçoit que les microondes émises par notre surface de dernière diffusion et que d'autres observateurs verront d'autres photons dont le détail des variations de température peuvent être différents¹⁴⁴.

Comme nous n'avons qu'un univers à notre disposition — ou que nous ne pouvons pas avoir le point de vue d'autres observateurs — il y a une certaine incertitude, connue sous le nom de *variance cosmique*, qui affecte la comparaison entre notre région et une région typique de l'univers. On représente alors les anisotropies sur un graphique où le multipole l est indiqué en abscisse (l est inversement proportionnel à l'échelle angulaire exprimée en degrés) et les fluctuations de température (exprimées par

¹⁴⁴LIDDLE, *An Introduction to Modern Cosmology*, p. 153.

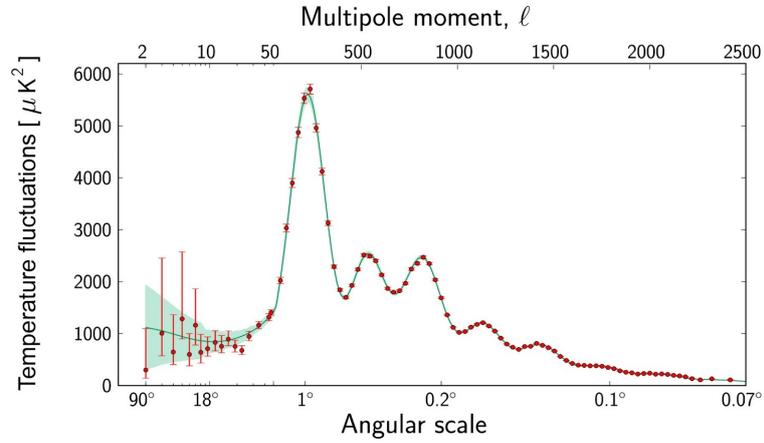


FIGURE 9.14 : Spectre de puissance extrait des données de Planck, 21 mars 2013. En rouge : données de Planck accompagnée de leur barre d'erreur et d'incertitude. En vert : prédictions du scénario d'inflation le plus ajusté aux données. La variance cosmique est plus importante pour les échelles angulaires importantes. Source : ESA.

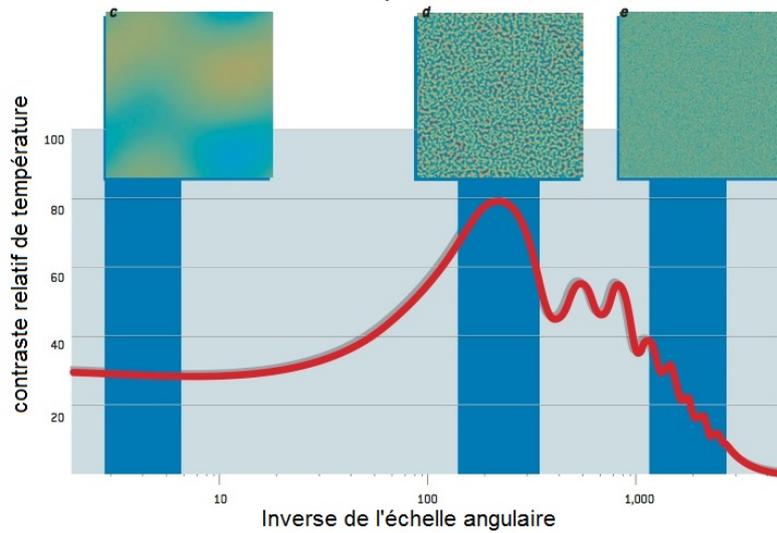


FIGURE 9.15 : Spectre prédit pour un modèle d'inflation par un programme comme CMBFAST.

une fonction de C_l ou en μK) en ordonnées. Ce spectre de puissance fut extrait des expériences de COBE dès 1992¹⁴⁵ et est toujours une des méthodes les plus employées pour comparer les modèles théoriques aux observations d'anisotropies (voir figure 9.14).

Représentée sous cette forme, les données sont comparables aux prédictions réalisables à partir de modèles cosmologiques et notamment de modèles d'inflation. La théorie de l'inflation permet en effet de réaliser un certain nombre de prédictions sur la taille et l'amplitude des fluctuations qui apparaissent dans le fond diffus cosmologique. En effet, l'expansion de l'Univers pendant sa phase d'expansion est suffisante pour que les fluctuations quantiques soient étendues jusqu'à être macroscopiques. D'autres fluctuations quantiques peuvent se rajouter à cette fluctuation de grande échelle et être elles aussi étendues, tant que l'univers n'est pas sorti de la phase d'expansion.

D'après la théorie de l'inflation, ces mécanismes aboutissent à des interactions entre photons, matière ionisée et matière noire qui forment un plasma dont les variations de densité sont des vibrations harmoniques. La longueur d'onde et l'amplitude de ces vibrations peuvent être prédites à partir des paramètres du modèle l'inflation choisi. Au moment de la recombinaison, les photons s'échappent en enregistrant un instantané des vibrations du plasma. On peut décomposer ces ondes comme on décompose un signal sonore ou électrique, en un spectre de puissance comparable à celui extrait des mesures des anisotropies du fond diffus cosmologique, et ainsi contraindre les différents paramètres du modèle d'inflation.

En pratique on utilise des logiciels comme CMBFAST qui permettent de calculer, pour un modèle d'inflation donné, la taille et l'amplitude des fluctuations pendant l'inflation¹⁴⁶ (voir figure 9.15).

COBE a permis de tester un certain nombre de prédictions *robustes* et *directes* faites par la théorie de l'inflation, c'est-à-dire de prédictions réalisées par la majorité des modèles d'inflation : le fait que les fluctuations de température sont invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude

¹⁴⁵SMOOT et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps".

¹⁴⁶LIDDLE, *An Introduction to Modern Cosmology*, p. 154.

ne dépend pas de la taille de la région considérée.

Cependant, COBE n'ayant qu'une résolution de 7 degrés, il n'a pu fournir qu'un spectre de puissance pour de grandes échelles angulaires ($l \leq 15$), insuffisant pour observer le premier pic¹⁴⁷. Il fallut attendre l'expérience BOOMERanG(1997-2003), installée dans un ballon en Antarctique pour repérer le premier pic prédit de ce spectre(voir figure 9.16). Cette expérience valida ainsi les prédictions des modèles d'inflation avec matière noire froide, c'est-à-dire des particules ayant des vitesses non relativistes.

Par la suite, d'autres missions utilisant des ballons ou des satellites comme Maxima(1998-1999) WMAP (2003) et Planck (2013) permirent de compléter ces études des anisotropies et de mieux contraindre les modèles d'inflation et les modèles cosmologiques en général.

C'est avec ces nouveaux moyens technologiques (à la fois d'observation comme COBE et de calculs numériques comme CMBFast) que la théorie de l'inflation a développé sa capacité prédictive et est devenue plus qu'une théorie *ad hoc*.

¹⁴⁷SMOOT et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps".

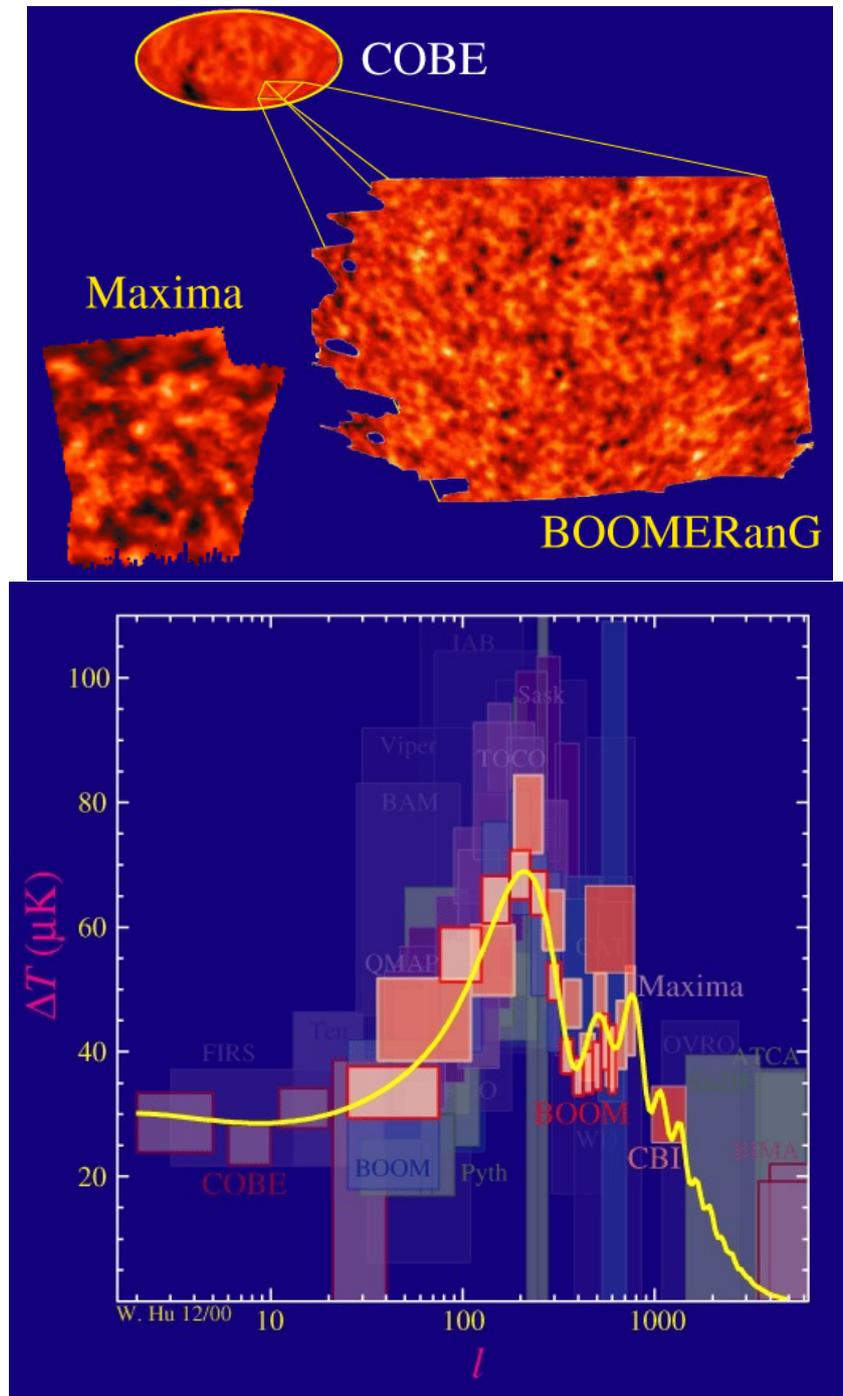


FIGURE 9.16 : En haut : comparaison du champ et de la résolution des données de COBE, Boomerang et Maxima. En bas : les différentes expériences qui ont permis, au cours des années 1990 d'explorer le spectre de puissance des anisotropies du fond diffus cosmologique.

Annexe au chapitre 6 : Le problème des preuves déjà connues est un vrai problème

La démonstration de C. Howson et P. Urbach

Le problème des preuves déjà connues se formule ainsi dans le cadre des théories bayésiennes de la confirmation. Soit une hypothèse h et une donnée e telles que :

- On est certain de e : $p(e) = 1$;
- $h \rightarrow e$: $p(e|h) = 1$;

Alors, si e est une donnée *neutre* par rapport à h (qui ne peut ni prouver ni infirmer h).

$$p(h|e) = p(h) \cdot \frac{1}{1} = p(h)$$

Ce résultat semble aller à l'encontre de cas historiques où de nouvelles théories ont été confirmées par des phénomènes connus depuis longtemps, comme la théorie de la relativité générale d'Einstein dont on admet en général que la première preuve fut sa capacité à déduire la valeur correcte de l'avancée du périhélie de Mercure.

Dans *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, C. Howson et P. Urbach ont soutenu qu'il ne s'agissait pas là d'un authentique problème pour les théories bayésiennes de la confirmation :

L'objection des « données déjà connue » n'est pas, en réalité, un problème sérieux pour la théorie bayésienne : en

fait, ce n'est même pas un problème du tout, du moins en principe. Ce qu'il montre réellement c'est une incapacité à appliquer correctement les formules bayésiennes.[...]

« Être une preuve de » désigne une *relation à trois arguments* entre les données, l'hypothèse dont il est question, et un ensemble d'informations d'arrière-plan k . Le problème des preuves déjà connues ne fait que nous rappeler que si e fait partie de k , elle devrait en être effacée avant d'affirmer qu'elle a un pouvoir de confirmation¹⁴⁸.

Les deux auteurs reprennent l'exemple de la confirmation de la relativité générale par l'avancée du périhélie de Mercure et posent :

- h : relativité générale
- e : le périhélie de Mercure avance de 574"/siècle
- En 1915, e est certain : $p(e) = 1$
- Les calculs d'Einstein montrent que $h \rightarrow e : p(e|h) = 1$.

Ils utilisent ensuite la notion de connaissance d'arrière-plan pour définir une fonction de probabilité $P(\cdot)$ qui est la fonction de probabilité d'un agent qui ne connaît pas e ($P(\cdot) = p(\cdot|k)$ avec $e \notin k$).

Enfin, ils utilisent une autre forme du théorème de Bayes :

$$P(h|e) = \frac{P(h)}{P(h) + P(\neg h) \frac{P(e|\neg h)}{P(e|h)}} \quad (9.23)$$

Si l'on se souvient que $P(e|h) = 1$), (9.23) devient :

$$P(h|e) = \frac{P(h)}{P(h) + P(\neg h)P(e|\neg h)} \quad (9.24)$$

On sait que $P(\neg h) = 1 - P(h)$. Il ne reste qu'à exprimer la probabilité $P(e|\neg h)$. En appliquant le théorème des probabilités totales, on a :

$$P(e|\neg h) = x(P(e|h_1)P(h_1) + \dots + P(e|h_n)P(h_i)) \quad (9.25)$$

¹⁴⁸HOWSON et URBACH, *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, p. 298-299.

où x est un nombre compris entre 0 et 1 et les n h_i représentent l'ensemble des hypothèses alternatives à h mutuellement exclusives.

C'est à cette étape que la preuve de C. Howson et P. Urbach invoque implicitement la notion de nouveauté théorique d'A. Musgrave. En effet, d'après eux, il n'existe qu'une seule et unique h_i plausible en 1915 : la théorie de la gravitation newtonienne, que l'on note h' . Toutes les autres $P(h_i)$ seraient proches de zéro.

Or on sait que $P(e|h') = \epsilon$ avec $0 \simeq \epsilon \ll 1$, puisque la théorie de Newton n'était pas capable de rendre compte de 43 des 574 secondes d'arc par siècle d'avancée du périhélie de Mercure.

(9.25) devient donc :

$$P(e|\neg h) = x(P(e|h')P(h')) = \epsilon.xP(h') \quad (9.26)$$

Même si l'on admet que $P(h')$ n'est pas négligeable, multipliée par ϵ elle devient très petite et quasiment égale à ϵ . On a donc :

$$P(h) + P(\neg h)P(e|\neg h) = P(h) + \epsilon(1 - P(h)) \approx P(h) \quad (9.27)$$

Si l'on réécrit (9.23) en prenant en compte (9.27), on aboutit à :

$$P(h|e) = \frac{P(h)}{P(h) + P(\neg h)P(e|\neg h)} \simeq \frac{P(h)}{P(h)} \simeq 1 \quad (9.28)$$

La conclusion de C. Howson et P. Urbach est donc que la théorie de la relativité générale est très confirmée par l'avancée du périhélie de Mercure puisque sa probabilité *a posteriori* est quasiment égale à 1.

Le problème des alternatives non conçues

Cette preuve peut être critiquée de nombreuses manières :

- Est-ce que réellement $P(e|h') = \epsilon$?
- « Supprimer » un phénomène e d'un ensemble d'informations d'arrière-plan k n'est pas une procédure simple : $k = [a, b]$ et $k' = [a, a \rightarrow b]$ sont équivalents, mais pas $k - \{a\}$ et $k' - \{a\}$.

- Puisque seul compte le rapport des vraisemblances de h et h' ($\frac{p(e|h')}{p(e|h)}$), à quoi sert de définir k et $P(\cdot)$?

Mais la principale objection *logique* que l'on puisse faire à la démonstration de C. Howson et P. Urbach, c'est qu'elle n'applique pas le théorème des probabilités totales de manière valide. En effet, une des conditions de la preuve de Howson et Urbach est que $p(e|\neg h) = p(e|h')p(h')$.

Par conséquent, d'après C. Howson et P. Urbach, $P(h \vee h') = 1$. Cela signifie que la théorie de la gravitation de Newton est la *seule* alternative plausible à la relativité générale d'Einstein.

Cela était peut-être vrai en 1915, mais cela ne l'est sûrement pas dans l'absolu. Il doit exister une ou plusieurs hypothèses alternatives à h et h' , sinon cela rendrait la recherche d'une nouvelle théorie de la gravitation absurde.

Cependant pour C. Howson et P. Urbach, cette conséquence n'a que peu d'importance, parce qu'en 1915 seules $P(h)$ et $P(h_i)$ n'étaient pas négligeables. En effet, à cette époque, la théorie de la gravitation de Newton et celle d'Einstein étaient les seules à avoir été proposées et donc étaient les seules auxquelles on pouvait attribuer une probabilité *a priori* non nulle.

Mais ce raisonnement ne les sort pas d'affaire. Une scientifique de 1915 pouvait estimer que même si la théorie de Newton et celle d'Einstein étaient les deux seules à avoir été formulées, il était plausible qu'il existe une théorie alternative non encore formulée qui était la bonne. Autrement dit, même du point de vue d'un agent rationnel de 1915, il faudrait attribuer une probabilité non négligeable aux hypothèses alternatives non conçues si l'on veut appliquer le théorème des probabilités totales.

$P(h \vee h') = 1$ n'est donc pas une application acceptable du théorème des probabilités totales. Il faut laisser la place à au moins une hypothèse alternative non conçue h^* quand on applique ce théorème :

$$P(h \vee h' \vee h^*) = 1$$

Cette formule rend inadéquate la résolution du problème des preuves déjà connues proposée par C. Howson et P. Urbach. En utilisant sans

l'expliciter la notion de nouveauté théorique, ils ont rencontré sans s'en rendre compte la limite de cette notion : le problème des alternatives non conçues.

Une solution au problème des preuves déjà connues

Si l'on fait attention à ce qu'A. Musgrave dit de la nouveauté théorique, on peut proposer une solution bien plus simple et élégante que celle de C. Howson et P. Urbach au problème des preuves déjà connues, à condition de modifier en profondeur les théories bayésiennes de la confirmation.

En effet, la définition de la nouveauté théorique d'A. Musgrave est que : e est un phénomène nouveau et surprenant par rapport à h ssi l'hypothèse alternative rivale h' incompatible avec h ne rend compte de e .

Cette définition impose que la confirmation est toujours contextualisée théoriquement : une confirmation est toujours un duel entre deux théories. Traduite en termes bayésiens, cette condition équivaut à dire que la confirmation est une relation à trois arguments entre une hypothèse h , une hypothèse alternative rivale h' et une preuve e . On peut ainsi définir une mesure de confirmation $c(\cdot)$ comme le rapport des probabilités *a posteriori* d'une hypothèse et d'une hypothèse rivale :

$$c(h, h', e) =_{def} \frac{p(h|e)}{p(h'|e)} = \frac{p(e|h) p(h)}{p(e|h') p(h')}$$

Si $c(h, h', e) > 1$ alors h est confirmée, si $c(h, h', e) < 1$ alors h est infirmée.

Si l'on applique cette mesure de confirmation au cas de la confirmation de la relativité générale par l'avancée du périhélie de Mercure, on se rend compte que le problème des preuves déjà connues à disparu. Soient :

- h : théorie de la relativité générale, avec $p(h) = 0,2$ (on pourrait choisir une autre probabilité *a priori* tant qu'elle n'est pas négligeable),

- h' : théorie de l'attraction universelle de Newton, avec $p(h') = 0,7$ (de même, la valeur précise de $p(h')$ compte peu tant qu'elle n'est pas négligeable),
- e : le périhélie de Mercure avance de $574''$ /siècle,
- $h \rightarrow e$ et donc $p(e|h) = 1$,
- par contre, $p(e|h') = 0,01$ (peu importe la valeur précise de $p(e|h')$ tant qu'elle est quasi-négligeable parce qu'un ordre de grandeur en dessous des autres données du problème).

Calculons avec ces valeurs $c(h, h', e)$:

$$c(h, h', e) = \frac{p(e|h) p(h)}{p(e|h') p(h')} = \frac{1 \cdot 0,2}{0,001 \cdot 0,7}$$

$$c(h, h', e) = 28,57$$

On peut donc dire que la théorie de la relativité générale h a été fortement confirmée par l'avancée du périhélie de Mercure e sans avoir à utiliser la probabilité *a priori* de e et donc sans rencontrer le problème des preuves déjà connues. En relativisant la confirmation à un duel entre deux hypothèses, on évite ainsi aussi le problème des alternatives non conçues.

Ainsi, cette mesure de la confirmation résout le problème des preuves déjà connues en faisant disparaître la question de la probabilité *a priori* de e et donc le problème des preuves déjà connues : tout ce qui compte dans la confirmation d'une hypothèse, c'est le rapport des probabilité *a priori* des hypothèses $\frac{p(h)}{p(h')}$ et le rapport des *vraisemblances des hypothèses*¹⁴⁹ que l'on appelle aussi « facteur de Bayes » et que l'on note $\beta(h, h')$:

$$\beta(h, h') =_{def} \frac{p(e|h)}{p(e|h')}$$

L'utilisation d'une mesure de confirmation proportionnelle au facteur de Bayes a de nombreux avantages en plus de résoudre le problème des

¹⁴⁹La vraisemblance d'une hypothèse h par rapport à une preuve e est la probabilité conditionnelle $p(e|h)$.

preuves déjà connues¹⁵⁰ que l'on ne peut développer mais qui suffisent à montrer que la solution proposée ici au problème des preuves déjà connues s'inspirant des travaux d'A. Musgrave n'est pas *ad hoc*.

¹⁵⁰Voir Richard JEFFREY, *Subjective probability : The real thing*, Cambridge University Press, 2004, p. 36-37.

Annexe au chapitre 7 : définition de la capacité prédictive

La capacité prédictive d'une théorie est sa capacité à prédire de nouveaux phénomènes. Bien évidemment, il n'est pas possible de déterminer à l'avance la capacité prédictive d'une théorie : seules les recherches des scientifiques peuvent montrer quelle est *de fait* le domaine d'application empirique d'une théorie en trouvant de nouvelles manières de résoudre des problèmes considérés comme légitimes.

Cependant, il est possible de montrer que la capacité prédictive d'une théorie dépend de l'équilibre entre quatre vertus épistémiques : la précision et la diversité des données dont elle rend compte d'une part, la simplicité de ses hypothèses fondamentales et la plausibilité de ses hypothèses auxiliaires d'autre part.

En effet si une théorie sacrifie la précision à sa simplicité ou l'inverse, elle ne pourra faire de prédictions précises. L'équilibre entre précision et simplicité permet ainsi de définir la précision prédictive.

L'équilibre entre diversité et plausibilité des hypothèses auxiliaires permet à une théorie de faire des prédictions nombreuses et diverses : c'est ce qui permet de définir la diversité prédictive. La capacité prédictive d'une théorie est la réunion de la précision et de la diversité prédictive.

La précision prédictive

On peut définir la précision prédictive comme le font C. Hitchcock, M. Forster et H. Sober, c'est-à-dire comme un équilibre entre l'ajustement d'une hypothèse aux données (mesurée par sa vraisemblance) et sa simplicité. En effet, comme C. Hitchcock, M. Forster et H. Sober le montrent¹⁵¹, une hypothèse trop complexe a de mauvais résultats en termes de prédictions de nouveaux échantillons de données.

La simplicité d'une hypothèse peut être définie, dans ce contexte, par le nombre de paramètres libres que l'on y trouve. Ce que suggèrent les recherches de C. Hitchcock, M. Forster et H. Sober, c'est que la simplicité a beaucoup plus de poids que l'ajustement aux données pour savoir si un modèle conservera la même précision quand on l'appliquera à de nouveaux échantillons.

C'est pourquoi ils choisissent le critère d'information d'Akaike comme mesure de la précision prédictive des hypothèses.

$$\text{score AIC}(M) = \log[p(\text{Données}|L(M))] - k \quad (9.29)$$

où M est un modèle statistique,

$L(M)$ est l'ajustement des paramètres libres de ce modèle qui maximalise sa vraisemblance aux données déjà connues,

$\log[p(\text{Données}|L(M))]$ représente la mesure de son adéquation aux données disponibles,

et k est le nombre de paramètres ajustables de M (et représente donc la complexité de M).

Puisque c'est le logarithme de la vraisemblance que l'on compare au nombre de paramètres ajustables, on voit que chaque perte de simplicité d'un ordre de grandeur doit être compensée par un gain de dix ordres de grandeur en terme d'ajustement aux données.

Dans la suite de cette annexe, je montre comment définir de manière équivalente la diversité prédictive d'une théorie comme un équilibre entre

¹⁵¹Voir FORSTER et SOBER, "How to tell when simpler, more unified, or less ad hoc theories will provide more accurate predictions" et HITCHCOCK et SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting".

diversité des preuves et plausibilité des hypothèses auxiliaires d'une théorie.

La diversité des preuves

Pour définir l'équilibre caractéristique de la diversité prédictive, il faut d'abord remarquer que cette notion n'apparaît que lorsque des théories sont en rivalité. En effet, pour caractériser la diversité entre des preuves, il faut deux phénomènes apparaissent comme faisant partie à deux genres différents. Mais cette classification en genres est toujours relative à une théorie donnée.

Pour prendre un exemple simplifié, dans la première classification du naturaliste Carl von Linné (1707-1778), les baleines étaient rangées dans la catégorie des poissons. Le fait que le requin et la baleine soient tout deux capables de rester sous l'eau pendant plusieurs heures n'apparaissait donc pas comme des faits de genres différents aux yeux de cette théorie. Autrement dit, si e_1 désigne le fait que les requins peuvent rester longtemps sous l'eau, e_2 le fait que les baleines peuvent rester longtemps sous l'eau, c la première classification de Linné, alors $p(e_1 \wedge e_2|c)$ était important puisqu'il n'y avait rien surprenant à ce que deux poissons aient les mêmes caractéristiques (surtout celle-ci).

En revanche, une fois la baleine replacée dans le genre des mammifères dans les classifications ultérieures de Linné (que l'on notera c'), alors on s'aperçoit que le requin a une respiration branchiale tandis que le fait que la baleine a une respiration pulmonaire, deux phénomènes de genres différents. D'après cette classification, il y a peu de raison de s'attendre à ce que les requins et les baleines partagent les mêmes caractéristiques. Cela se traduit ainsi : $p(e_1 \wedge e_2|c') > p(e_1|c')$ (ou $p(e_1 \wedge e_2|c') > p(e_2|c')$).

Une théorie, comme la théorie de l'évolution par exemple, qui arrive alors à rendre compte du fait que les baleines comme les requins arrivent à rester longtemps sous l'eau, sera donc plus confirmée si on la compare à une classification qui considère que e_1 et e_2 sont des phénomènes de genres différents que si on la compare à une classification qui considère que e_1 et e_2 sont du même genre. Autrement dit, la diversité prédictive

ou pouvoir unificateur d'une théorie apparaît lorsqu'on la compare à une autre théorie qui considère des phénomènes comme relevant de genre différents. On peut en donner une preuve en utilisant les probabilités conditionnelles et le théorème de Bayes :

Soient e_1 et e_2 des phénomènes de genre différents pour une théorie t_1 . Dire qu'ils sont de genres différents implique que la conjonction de ces phénomènes est peu probable si l'on tient cette théorie pour vraie :

$$p(e_1 \wedge e_2 | t_1) < p(e_1 | t_1) \quad (9.30)$$

En revanche, si l'on suppose une théorie rivale t_2 dont la probabilité *a priori* est comparable à celle de t_1 et qui peut prédire aussi bien e_1 que e_2 , alors :

$$p(e_1 \wedge e_2 | t_1) \ll p(e_1 \wedge e_2 | t_2) \quad (9.31)$$

À partir des équations ci-dessus et du théorème de Bayes, on montre aisément que t_1 devrait être plus confirmée que t_2 par $e_1 \wedge e_2$ (on utilise ici la mesure de confirmation définie dans l'annexe au chapitre 6) :

$$\frac{p(t_2 | e_1 \wedge e_2)}{p(t_1 | e_1 \wedge e_2)} = \frac{p(t_2) p(e_1 \wedge e_2 | t_2)}{p(t_1) p(e_1 \wedge e_2 | t_1)} \quad (9.32)$$

Puisque $p(e_1 \wedge e_2 | t_1) \ll p(e_1 \wedge e_2 | t_2)$, le rapport de l'équation ci-dessus sera en faveur de t_2 (sauf dans le cas où $p(t_2)$ serait très petit devant $p(t_1)$, cas que l'on a exclu).

Ce résultat est bien connu des bayésiens, qui considèrent que leurs théories de la confirmation reflètent la vertu épistémique de *diversité des preuves*¹⁵².

¹⁵²Voir Vincenzo CRUPI, "Confirmation", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward ZALTA, Hiver 2016, Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016, section 3.6.

Le problème de Duhem et la tension entre diversité des preuves et plausibilité des auxiliaires

Avec ce résultat, on peut aussi montrer que le problème de Duhem implique une tension entre la diversité des preuves et la plausibilité des hypothèses auxiliaires (c'est-à-dire qu'il est possible de sacrifier la plausibilité de ces hypothèses pour augmenter la diversité des preuves).

Commençons par réécrire t_1 et t_2 pour faire apparaître ces hypothèses auxiliaires. On peut considérer, avec Lakatos, qu'une théorie est la conjonction d'un noyau dur, c'est-à-dire d'hypothèses fondamentales que l'on notera respectivement h_1 et h_2 et d'un glacis protecteur, c'est-à-dire d'hypothèses auxiliaires, que l'on notera a_1 et a_2 .

L'équation (9.32) se réécrit donc ainsi :

$$\frac{p(h_2 \wedge a_2 | e_1 \wedge e_2)}{p(h_1 \wedge a_1 | e_1 \wedge e_2)} \gg 1 \quad (9.33)$$

Cependant, ce que nous dit le problème de Duhem, c'est que pour toute théorie, il existe un ensemble d'hypothèses auxiliaires qui lui permettent d'éviter la réfutation. Autrement dit, il est possible de substituer aux hypothèses auxiliaires a_1 un autre ensemble d'hypothèses a'_1 tel que :

$$\frac{p(h_2 \wedge a_2 | e_1 \wedge e_2)}{p(h_1 \wedge a'_1 | e_1 \wedge e_2)} = 1 \quad (9.34)$$

On peut montrer que dans ce cas, on sacrifie soit la plausibilité de ces hypothèses auxiliaires à la diversité des preuves, soit l'inverse. En effet si l'on applique le théorème de Bayes au numérateur et au dénominateur de la précédente équation on obtient :

$$\frac{p(h_2 \wedge a_2)}{p(h_1 \wedge a'_1)} \cdot \frac{p(e_1 \wedge e_2 | h_2 \wedge a_2)}{p(e_1 \wedge e_2 | h_1 \wedge a'_1)} \quad (9.35)$$

En réorganisant, on a :

$$\frac{p(e_1 \wedge e_2 | h_2 \wedge a_2)}{p(e_1 \wedge e_2 | h_1 \wedge a'_1)} = \frac{p(h_1 \wedge a'_1)}{p(h_2 \wedge a_2)} \quad (9.36)$$

Or, $p(h_2 \wedge a_2) = p(a_2|h_2).p(h_2)$ et $p(h_1 \wedge a'_1) = p(a'_1|h_1).p(h_1)$. Si l'on pose $k = p(h_1)/p(h_2)$, (9.36) se réécrit donc :

$$\frac{p(e_1 \wedge e_2|h_2 \wedge a_2)}{p(e_1 \wedge e_2|h_1 \wedge a'_1)} = k \cdot \frac{p(a'_1|h_1)}{p(a_2|h_2)} \quad (9.37)$$

Ainsi, le rapport $p(a'_1|h_1)/p(a_2|h_2)$ est inversement proportionnelle au rapport des vraisemblances $p(e_1 \wedge e_2|h_2 \wedge a_2)/p(e_1 \wedge e_2|h_1 \wedge a'_1)$. Autrement dit, la plausibilité des hypothèses auxiliaires est inversement proportionnelles à la diversité des preuves dont une théorie peut rendre compte : ces deux vertus épistémiques sont bien en tension, on peut sacrifier l'une pour obtenir l'autre.

Par conséquent, il est parfaitement légitime et rationnel de suspecter que quand une théorie change son glaciis protecteur d'hypothèses auxiliaires uniquement pour *rester dans la course*, c'est-à-dire ne pas être éliminée par une autre théorie qui rend compte de phénomènes d'un nouveau genre, elle l'ait fait au détriment de la plausibilité de ses hypothèses auxiliaires.

On remarque que ce n'est pas la probabilité *a priori* des hypothèses auxiliaires $p(a)$ qui apparaît dans l'équation (9.37) mais la probabilité conditionnelle $p(a|h)$ ¹⁵³. Cela suggère que la plausibilité d'une hypothèse auxiliaire doit être évaluée non pas isolément, mais du point de vue de celui qui tient une hypothèse fondamentale comme vraie. Cela fait écho à une autre remarque de Lakatos, selon laquelle il existe des hypothèses auxiliaires que l'on peut qualifier de *ad hoc* parce qu'elles « ne s'accordent pas avec l'esprit de l'heuristique du programme de recherche », comme par exemple, l'hypothèse de mouvements périodiques des particules lumineuses dans la théorie corpusculaire de la lumière, ou l'existence de « mini-big bang » dans la théorie de l'état stationnaire. Ce que suggère la présente analyse c'est que cette forme d'hypothèse *ad hoc* est particu-

¹⁵³En réalité, on peut aussi considérer que $p(h \wedge a) = p(h|a).p(a)$, formule qui fait apparaître la probabilité *a priori* de a . Mais si l'on réécrit ainsi $p(h \wedge a)$ on fait face à la difficulté de devoir donner un sens à $p(h|a)$, c'est pourquoi on a choisi ici la formulation parfaitement équivalente $p(h \wedge a) = p(a|h).p(h)$. La morale de l'histoire reste la même dans les deux formulations : pour évaluer la plausibilité d'une hypothèse auxiliaire, il faut considérer la relation de sa probabilité à celle de l'hypothèse fondamentale à laquelle elle est conjointe.

lièrement importante dans l'abandon d'une théorie qui essaye de s'étendre à de nouveaux domaines.

Enfin, ce que montre l'équation (9.37), c'est aussi que le rapport k des probabilités *a priori* de h_1 et h_2 donne un avantage aux théories dont les hypothèses fondamentales semblent les plus fiables (parce qu'elles sont compatibles avec d'autres connaissances ou implantées depuis longtemps, ou pour toute autre raison) : celles-ci ont plus de marge pour utiliser des hypothèses auxiliaires peu plausibles. Cela explique la réticence de certains scientifiques à abandonner des théories bien implantées et leurs tentatives pour leur adjoindre des hypothèses auxiliaires qui, de leur propre aveu, sont peu plausibles — c'est ce qu'ont fait par exemple les partisans des théories corpusculaires de la lumière. Ces scientifiques ne manquent ni de bon sens ni de rationalité tant qu'ils estiment que cette perte en plausibilité est compensée par la probabilité *a priori* de leur hypothèse fondamentale.

La diversité prédictive

Maintenant que l'on a montré que la diversité des preuves est en tension avec la plausibilité des hypothèses auxiliaires, on peut évaluer à quelle condition l'ajout de l'hypothèse auxiliaire a_1 n'est pas un cas de tricherie où l'on sacrifie sa plausibilité pour étendre une théorie à des phénomènes de nouveau genre. Si l'on reprend l'équation (9.36), il faut que :

$$\frac{p(e_1 \wedge e_2 | h_1 \wedge a'_1)}{p(e_1 \wedge e_2 | h_2 \wedge a_2)} - \frac{p(h_2 \wedge a_2)}{p(h_1 \wedge a'_1)} > 1 \quad (9.38)$$

Ce qui revient à :

$$\frac{p(e_1 \wedge e_2 | h_1 \wedge a'_1)}{p(e_1 \wedge e_2 | h_2 \wedge a_2)} - k \cdot \frac{p(a_2 | h_2)}{p(a'_1 | h_1)} > 1 \quad (9.39)$$

Autrement dit, il est nécessaire que l'extension d'une théorie à un nouveau domaine ait un coût en plausibilité d'hypothèse moins important que le gain en adéquation aux données que lui apporte cette extension. Par analogie avec le score AIC du critère d'Akaike, on peut donc mesurer le score DP (pour diversité prédictive) d'une théorie par rapport à sa

rivale :

$$\text{score DP}(t_1) = \frac{p(e_1 \wedge e_2 | h_1 \wedge a'_1)}{p(e_1 \wedge e_2 | h_2 \wedge a_2)} - k \cdot \frac{p(a_2 | h_2)}{p(a'_1 | h_1)}$$

Si ce score est positif, la théorie t_1 est confirmée par l'ajout des hypothèses auxiliaires a_1 ; s'il est inférieur ou égal à zéro, c'est que cet ajout est *ad hoc* et ne fait pas augmenter réellement la diversité prédictive de la théorie.

De même que le score AIC permet de définir la précision prédictive d'une hypothèse, le score DP permet de définir la précision prédictive d'une théorie.

On pourrait être tenté de définir la capacité prédictive d'une théorie de manière ramassée comme une fonction de la précision prédictive et de la diversité prédictive $CP(t) = f(\text{score AIC}(t), \text{score DP}(t))$. Mais le problème de cette approche, c'est qu'elle suppose que l'on puisse évaluer de manière univoque la plausibilité d'une hypothèse auxiliaire par rapport à une théorie, c'est-à-dire que l'on puisse fixer $p(a|t)$ et $p(a'|t)$. Or une telle mesure est impossible à faire sans ambiguïté, parce que la probabilité conditionnelle d'une hypothèse par rapport à une certaine théorie apparaît de manière différente selon que l'on est ou non partisan de cette théorie. Si l'on est bayésien, on estime en effet que $p(a|t)$ représente le degré de croyance en a d'un agent qui admet t . Contrairement aux travaux de M. Forster, C. Hitchcock et E. Sober, l'analyse de la capacité prédictive dans cette annexe n'a donc pas pour vocation d'être réellement utilisée comme critère de choix théorique, mais uniquement comme clarification de la notion de capacité prédictive. Il n'est donc pas nécessaire de se lancer ici dans une tentative pour construire la fonction $CP(t)$.

Annexe au chapitre 8 : la dérivation de la prédiction du point lumineux à partir des intégrales de Fresnel

markbothAnnexe au chapitre 8

Cette annexe expose la prédiction du point lumineux à partir des intégrales de Fresnel telle qu'elle peut être trouvée dans un manuel d'optique moderne¹⁵⁴ mais en n'utilisant que des outils mathématiques disponibles au début du XIX^e siècle.

On commence par appliquer l'intégrale de Kirchhoff-Fresnel pour calculer l'amplitude u de l'onde lumineuse au centre de l'ombre d'un écran circulaire :

$$u = A2\pi\rho_0 \int_{\sqrt{a^2+\rho_0^2}}^{\infty} \left(\frac{1}{\rho^2}\right) e^{ik2\rho} d\rho \quad (9.40)$$

Dans cette formule, u est l'amplitude de l'onde au centre de l'ombre, A l'amplitude de l'onde à la source lumineuse et a est le rayon de l'objet circulaire. ρ est la distance entre l'onde diffractée et le centre de l'ombre et ρ_0 est la distance entre le centre de l'objet circulaire et le centre de l'ombre (voir figure 9.17).

$\sqrt{a^2 + \rho_0^2}$ est alors la distance entre le bord de l'objet et le centre de son ombre. Ainsi, l'intégrale (9.40) représente la contribution de toute la lumière diffractée au centre optique de l'écran, c'est-à-dire le centre de

¹⁵⁴Kart MOELLER, *Optics : Learning by Computing, with Examples Using Maple, MathCad, Matlab, Mathematica, and Maple*, Dordrecht, Springer, 2007, p. 133.

l'ombre.

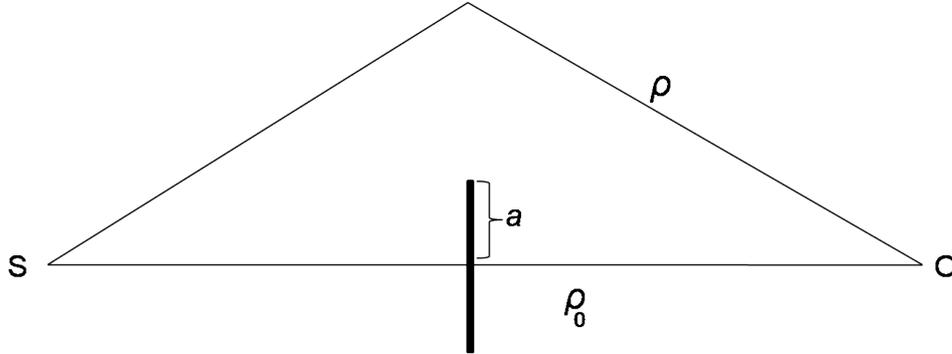


FIGURE 9.17 : Diffraction par un objet circulaire : S est la source de lumière, O le centre optique.

L'intégration par parties de (9.40) donne :

$$u = \left[\left(\frac{1}{\rho^2} \right) \left(\frac{1}{2ik} \right) e^{ik2\rho} \right]_{\sqrt{a^2 + \rho_0^2}}^{\infty} + (1/ik) \int_{\sqrt{a^2 + \rho_0^2}}^{\infty} \left(\frac{1}{\rho^3} \right) e^{ik2\rho} d\rho \quad (9.41)$$

On néglige le membre de droite :

$$u = \left[\left(\frac{1}{\rho^2} \right) \left(\frac{1}{2ik} \right) e^{ik2\rho} \right]_{\sqrt{a^2 + \rho_0^2}}^{\infty} \quad (9.42)$$

Pour résoudre cette équation, il faut supposer qu'à l'infini, l'onde lumineuse n'est pas diffractée et donc que les rayons à l'infini ont une contribution nulle à l'interférence constructive au centre de l'ombre.

Si on pose $I_0 = A^2 \frac{\rho_0^2}{\sqrt{a^2 + \rho_0^2}}$, alors (9.42) donne :

$$I = \frac{I_0 \lambda^2}{4} \quad (9.43)$$

L'intensité I au centre de l'ombre ne dépend donc que de la longueur d'onde et est proportionnelle à $I_0/4$ pour une longueur d'onde donnée. Ce résultat correspond à l'intensité que l'on observerait en l'absence d'obstacle, ce qui signifie que le centre de l'ombre autant illuminé qu'en l'absence d'obstacle.

Index rerum

- Activité prédictive, *voir*
Raisonnement prédictif
- Ajustement forcé, 283, 284, 311,
344, 347, 351, 357, 362,
366, 368, 376, 525, 529
- Antiprédictivisme, 263, 265, 268,
277, 279, 288, 291, 304
- Antiréalisme, 9, 476, 509, 510,
513, 517
- Argument d'indispensabilité,
406, 436, 450, 452, 463,
517
- Argument de la tricherie, 347,
349–351, 356, 361, 362,
365, 367, 390, 529, 621
- Argument du miracle, 10, 13, 17,
55, 127, 393, 398–401,
412, 418, 435, 447, 462,
471, 472, 496, 532, 535
- Big bang, *voir* Nucléosynthèse
primordiale
- Blobs, 212
- Capacité prédictive, 111, 125,
131, 155, 185, 188, 211,
248, 250, 255, 297, 367,
373, 376, 390, 391, 393,
406, 431, 454, 524, 530
définition, 4, 370, 615
- Causalité, 32, 485, 489, 496
- Conditions aux limites, 62, 103,
139, 211, 425, 482
- Critère d'information d'Akaike,
355
- Définition des prédictions
définition générale, 3
heuristique, 37, 290, 317,
320, 324, 328, 338, 340,
356, 390, 402, 419, 420
temporelle, 37
théorique, 38, 318, 328, 420
- de Sitter
effet de, 149, 579
modèle de, 146, 149
- Données massives (Big Data),
110, 111, 115, 121, 122,
524
- Énoncé prédictif, 380, 512
définition, 2
de prédiction technique, 480
- Équations de
Friedmann-Lemaître,
147, 579
- Espèces naturelles (*natural
kind*), 273
- Extrapolation et interpolation,
41, 71, 107, 359, 418,
522, 565
- Fond diffus cosmologique, 203,
205, 207, 217, 222, 225,
240, 248, 527
prédiction du, 185, 204, 211,
251, 445, 527

- Fusil à pompe
 chasse au, 344
- Idéalisations, 64, 65, 72, 139,
 422, 434, 462, 532
 abstraction et
 approximation, 427
 et désidéalisation, 427, 482
- Induction, 28, 96, 192, 252, 286,
 300, 305
 chez Mill, 274, 278
 chez Whewell, 269, 272, 402
 nouvelle énigme, 292, 380
 problème, 64, 326, 461
- Induction pessimiste, 12, 14,
 131, 167, 399, 413, 415,
 434, 460, 472, 478, 510
- Inférence à la meilleure
 explication, 90, 402, 412,
 450
- Inflation
 capacité prédictive, 239
 modèle de Guth, 229
 modèle de Starobinsky, 227
 pouvoir prédictif, 227
 théorie, 219
- Méthodologie des programmes
 de recherche, 309, 314,
 362
- Manipulation et détection, 469
- Multivers, 383
- Nucléosynthèse primordiale,
 176, 179, 397
 capacité prédictive, 200
 pouvoir prédictif, 185
 prédictions, 181, 205, 526,
 535
- Pouvoir prédictif, 185
 définition, 4
 de la géologie, 85
 de la théorie de l'évolution,
 77
- Prédiction de l'existence de
 Neptune, 5, 35, 59, 301,
 413, 445
- Prédiction de l'expansion de
 l'Univers, 6, 153, 154,
 158, 170, 445, 527, 579
- Prédiction de la classification
 périodique de
 Mendeleïev, 11, 16, 261,
 335, 409
- Prédiction du modèle de Bohr,
 6, 458
- Prédiction du point lumineux,
 400, 409, 419, 421, 423,
 436, 437, 480
- Prédiction du retour de la
 comète de Halley, 187
- Prédiction du retour de la
 comète de Halley, 379
- Prédictions
 techniques, 486
 et explications, 27, 88, 124,
 521
 fécondes, 215, 244, 255, 297,
 453, 527
 nouvelles, 400, 415
 risquées, 526
 robustes, 106, 163, 205, 228,
 243, 525
 techniques, 481, 488, 491,
 495, 517, 536
- Prédictions de la dynamique
 newtonienne, 36, 67,
 124, 140, 187, 271
- Prédictivisme, 14, 263
 conditionnel et
 inconditionnel, 254, 263,
 268, 284, 301, 306, 310,
 314, 339, 344, 347, 358
 faible et fort, 357, 358

- Principe de pureté logique de la confirmation, 287
- Problème de Duhem, 303, 309, 327, 368, 391, 619
- Problème de Keynes, 288, 307, 309, 312, 318, 319, 327, 348, 528
- Problème de Mill, 278, 304, 306, 307, 312, 327
- Problème de Peirce, 311, 321, 327
- Problème des preuves déjà connues, 313, 322, 327, 330, 607
- Prophétie, 2
- Réalisme scientifique, 9
des entités, 467
dilemme, 126, 533
sélectif, 435
semiréalisme, 477
structural, 435
- Réalisme scientifique, dilemme, 431
- Réfutation, 192, 199, 205, 208, 212, 239, 248, 305, 310, 404, 586, 597
- Raisonnement prédictif, 122, 423, 523
définition, 2
en cosmologie, 163
guidé par des données, 24, 92, 99, 110, 364
guidé par des lois, 24, 61, 69, 76, 89, 364, 442
guidé par des modèles, 24, 101, 107, 364, 442
- Réalisme structural, 16
- Relation de Slipher-Hubble, 43, 256, 360, 491
- Sous-détermination prédictive, 159, 203, 437, 532
- Stratégie *divide et impera*, 15, 435, 446, 502
- Succès prédictif
portée, 525
technique, 537
- Théorie de l'état stationnaire, 176, 182, 184, 190, 200, 206, 211, 249, 530, 583
capacité prédictive, 195
fécondité, 253
pouvoir prédictif, 185
prédictions, 184, 198
- Théories bayésiennes de la confirmation, 321, 607, 617
- Vertus épistémiques, 349, 357, 367, 370, 377, 393, 529

Index nominum

- Alai, Mario, 422
Alpher, Ralph, 175, 179, 189, 203
Anderson, Chris, 118, 121
Ardourel, Vincent, 298
Aristote, 5
Asimov, Isaac, 456
- Bachelard, Gaston, 482, 493, 498, 538
Barnes, Eric, 333
Batterman, Robert, 429
Bondi, Hermann, 175, 182, 183, 191, 583
Brush, Stephen, 178, 206, 306
- Carnap, Rudolf, 47, 54, 70, 262, 517, 537
Cartwright, Nancy, 58, 62
Chakravartty, Anjan, 16, 427, 476, 501, 507, 516, 535
Clairaut, Alexis, 187, 379
Comte, Auguste, 266, 277, 443
- de Sitter, Willem, 64, 136, 145, 158
Dicke, Robert, 203, 229, 535
Douglas, Heather, 57, 125, 361, 375
Dowek, Gilles, 116
Duhem, Pierre, 14, 68, 131, 209, 299, 300, 408, 450, 463, 508
- Einstein, Albert, 17, 136, 138, 146, 149, 158, 315, 346, 461, 502
Ellis, George, 169, 217, 234, 247, 577
Fisher, Ronald, 341
- Gamow, George, 175, 179, 197
Gold, Thomas, 175, 182, 183, 583
Goodman, Nelson, 292, 327, 376, 389
Guth, Alan, 223
- Hacking, Ian, 466, 491, 535
Hempel, Carl, 24, 27, 36, 39, 53, 62, 289, 572
Herman, Robert, 175, 179, 189, 203
Hitchcock, Christopher, 351
Howson, Colin, 324, 607
Hoyle, Fred, 175, 182, 183, 194, 196, 197, 201, 202, 205, 227, 583
Hubble, Edwin, 43, 46, 66, 137, 150, 153
- Iverson, Richard, 109, 112, 119
- Jebeile, Julie, 426
- Kant, Emmanuel, 166
Keynes, John Maynard, 286

- Kistler, Max, 32, 496
 Kitcher, Philip, 434
 Kragh, Helge, 148, 152, 157, 206
 Kuhn, Thomas, 166, 171, 309,
 346, 373, 377, 530
 Lakatos, Imre, 209, 309, 316,
 320, 326, 339, 363, 619,
 620
 Laudan, Larry, 11, 167, 273
 Laymon, Richard, 126, 428
 Le Verrier, Urbain, 59, 301, 413
 Lemaître, Georges, 151, 154, 580
 Leplin, Jarett, 419
 Lipton, Peter, 348, 529
 Lyons, Timothy, 16, 436
 MacMullin, Ernan, 428
 Maher, Peter, 331
 Mayo, Deborah, 284, 342
 Mayr, Ernst, 77, 571
 Mendeleïev, Dmitri, 261, 332,
 335
 Mill, John Stuart, 267
 Morrison, Margaret, 472, 508
 Murray, Brad, 101
 Musgrave, Alan, 14, 328
 Neyman, Jerzy, 341
 Orgogozo, Virginie, 93
 Pearson, Karl, 341
 Peebles, Jim, 203, 214, 222, 229,
 535
 Peirce, Charles Sanders, 279,
 352, 357
 Platon, 366
 Poincaré, Henri, 14, 131, 403
 Popper, Karl, 84, 178, 191, 192,
 207, 238, 249, 251, 305,
 342, 345, 451, 481, 574
 Psillos, Stathis, 15, 435
 Putnam, Hilary, 10
 Ruphy, Stéphanie, 53, 58, 246,
 432, 494
 Russell, Bertrand, 537
 Saatsi, Juha, 500, 501, 518
 Scheffler, Israel, 34, 39
 Scriven, Michael, 32, 33, 79, 572
 Smart, John, 10, 84, 574
 Sober, Elliott, 51, 351
 Stanford, Kyle, 16, 451, 509,
 519, 537
 Stern, David, 93
 Vickers, Peter, 16, 63, 433
 Votsis, Ioannis, 16, 458
 Wagner, Pierre, 47, 295
 Weinberg, Steven, 213, 223, 460
 Whewell, William, 267, 359, 402
 Wilcock, Peter, 109, 112, 119
 Williams, Mary, 81
 Winther, Ramsus, 92
 Woodward, James, 56, 485, 489,
 507
 Worrall, John, 14, 16, 55, 168,
 335, 409
 Zahar, Élie, 314, 328

Bibliographie

- ABITEBOUL, Serge, “Sciences des données : de la logique du premier ordre à la Toile, Leçon inaugurale au Collège de France prononcée le 8 mars 2012” (2012).
- AKAIKE, Hirotugu, “Information theory and an extension of the maximum likelihood principle”, *2nd International Symposium on Information Theory*, Academiai Kiado, Budapest, 1973.
- ALAI, Mario, “Novel Predictions and the No Miracle Argument”, *Erkenntnis* 79.2 (2014), p. 297–326.
- ALBRECHT, Albert et Paul STEINHARDT, “Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking”, *Physical Review Letters* 48 (1982), p. 1220.
- ALPHER, Ralph et Robert HERMAN, “Evolution of the universe”, *Nature* 162 (1948), p. 774–775.
- ALPHER, Ralph et Robert HERMAN, “Neutron-capture theory of element formation in an expanding Universe”, *Physical Review* 84.1 (1951), p. 60.
- ANDERSON, Chris, “The End of Theory”, *Wired magazine* 16 (2008), p. 108–109.
- ARDOUREL, Vincent, “A discrete solution for the paradox of Achilles and the tortoise”, *Synthese* 192.9 (2015), p. 2843–2861.
- ARDOUREL, Vincent et Julie JEBEILE, “On the presumed superiority of analytical solutions over numerical methods”, *European Journal for Philosophy of Science* (2016), p. 1–20.
- ATLAS et al., “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, *Physics Letters B* 716.1 (2012), p. 1–29.
- BACHELARD, Gaston, *La Formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin, 1938.
- BACHELARD, Gaston, *Le Matérialisme rationnel*, Paris, Presses Universitaires de France, 1953.
- BACHELARD, Gaston, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses Universitaires de France, 1949.
- BARNES, Eric, “Social Predictivism”, *Erkenntnis* 45.1 (1996), p. 69–89.
- BARNES, Eric Christian, “Predictivism for pluralists”, *The British journal for the philosophy of science* 56.3 (2005), p. 421–450.

- BARRAU, Aurelien, "Physics in the multiverse : an introductory review", *CERN Courier* 47.10 (2007).
- BARROW, John et Michael TURNER, "The Inflationary Universe. Birth, death and transfiguration", *Nature* 298 (1982), p. 801–805.
- BATTERMAN, Robert, "On the explanatory role of mathematics in empirical science", *The British journal for the Philosophy of Science* 61.1 (2010), p. 1–25.
- BEAUMONT, Mark et al., "Adaptive approximate Bayesian computation", *Biometrika* 96.4 (2009), p. 983–990.
- BERNARD, Claude, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris, Garnier-Flammarion (1966), 1865.
- BIOT, Jean-Baptiste, *Traité de physique expérimentale et mathématique*, t. 4, Paris, Deterville, 1816.
- BLANCHÉ, Robert, *L'Induction scientifique et les lois naturelles*, Paris, Presses Universitaires de France, 1975.
- BLANCHET, Luc et al., "Gravitational-Radiation Damping of Compact Binary Systems to Second Post-Newtonian Order", *Physical Review Letters* 74 (18 1995), p. 3515–3518.
- BOGEN, James et James WOODWARD, "Saving the phenomena", *The Philosophical Review* 97.3 (1988), p. 303–352.
- BONDI, Hermann et Thomas GOLD, "The steady-state theory of the expanding universe", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108 (juillet 1948), p. 252.
- BONDI, Hermann et Clive KILMISTER, "The Impact of Logik der Forschung", *The British Journal for the Philosophy of Science* 10.37 (1959), p. 55–57.
- BONNAY, Denis, "L'explication scientifique", *Précis de philosophie des sciences*, Paris, Vuibert, 2011, chap. 1, p. 13–61.
- BROMBERGER, Sylvain, "Questions", *The Journal of Philosophy* 63.20 (1966), p. 597–606.
- BRUNET, Pierre, "La Vie et l'œuvre de Clairaut", *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* 6.1 (1953), p. 1–17.
- BRUSH, Stephen, "Dynamics of theory change in chemistry", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 30.1 (1999), p. 21–79.
- BRUSH, Stephen, "Prediction and theory evaluation : cosmic microwaves and the revival of the Big Bang.", *Perspectives on science* (1993).
- BRUSH, Stephen, "Prediction and theory evaluation in physics and astronomy", *No truth except in the details*, Boston, Kluwer, 1995, p. 299–318.
- BRUSH, Stephen, "Prediction and Theory Evaluation : The Case of Light Bending", *Science* 246.4934 (1989), p. 1124–1129.
- BRUSH, Stephen, "Predictivism and the periodic table", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 38.1 (2007), p. 256–259.
- BUCHDAHL, Gerd, "Inductivist Versus Deductivist Approaches in the Philosophy of Science as Illustrated by Some Controversies Between Whewell and Mill", *The Monist* 55.3 (1971), p. 343–367.

- BUCHERT, Thomas, “A Cosmic equation of state for the inhomogeneous universe : can a global far-from-equilibrium state explain dark energy ?”, *Classical and Quantum Gravity* 22 (2005), p. 113–119.
- BURBIDGE, Margaret et al., “Synthesis of the elements in stars”, *Reviews of Modern Physics* 29 (1957), p. 547–650.
- CARNAP, Rudolf, “Empiricism, Semantics, and Ontology”, *Revue internationale de philosophie* (1950), p. 20–40.
- CARNAP, Rudolf, *Logical Foundations of Probability*, Chicago, University of Chicago Press, 1962.
- CARNAP, Rudolf, *Philosophical foundations of physics : an introduction to the philosophy of science*, New York, Basic Books, 1966.
- CARTWRIGHT, Nancy, *How the Laws of Physics Lie*, New York, Clarendon Press, 1983.
- CARTWRIGHT, Nancy, *The Dappled World : A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.
- CHAKRAVARTTY, Anjan, *A Metaphysics for Scientific Realism : Knowing the Unobservable*, Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- CHAKRAVARTTY, Anjan, “Semirealism”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 29.3 (1998), p. 391–408.
- CHAKRAVARTTY, Anjan, “Suspension of belief and epistemologies of science”, *International Journal for the Study of Skepticism* 5.2 (2015), p. 168–192.
- CHAKRAVARTTY, Anjan, “What you don’t know can’t hurt you : realism and the unconceived”, *Philosophical Studies* 137.1 (2008), p. 149–158.
- CLAIRAUT, Alexis, “Lettre de M. Clairaut à Messieurs les Auteurs du Journal des Sçavants”, *Journal des savants* (1761).
- CLAIRAUT, Alexis, “Mémoire sur la comète de 1682, adressé à MM. les Auteurs du Journal des Sçavants”, *Journal des savants* (1758).
- CLELAND, Carol, “Historical science, experimental science, and the scientific method”, *Geology* 29.11 (2001), p. 987–990.
- CLELAND, Carol, “Prediction and Explanation in Historical Natural Science”, *British Journal for the Philosophy of Science* 62.3 (2011), p. 551–582.
- COMTE, Auguste, *Cours de philosophie positive*, vol.2, Paris, Borel et Droz, 1835.
- COPERNIC, Nicholas, *Des Révolutions des orbes célestes*, trad. par Alexandre KOYRÉ, Paris, Auguste Blanchard, 1543.
- COZIC, Mikaël, “Confirmation et induction”, *Précis de philosophie des sciences*, sous la dir. d’Anouk BARBEROUSSE, Denis BONNAY et Mikaël COZIC, Paris, Vuibert, 2011.
- CRUPI, Vincenzo, “Confirmation”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d’Edward ZALTA, Hiver 2016, Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016.
- DAVID, Patrick et Sarah SAMADI, *La Théorie de l’évolution : Une logique pour la biologie*, Paris, Flammarion, 2011.

- DE SITTER, Willem, “Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. Third paper”, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 78 (1917), p. 3–28.
- DE SITTER, Willem, “On the curvature of space”, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings* 20 (1917), p. 229–243.
- DE SITTER, Willem, “On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein’s latest hypothesis”, *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings* 19 (1917), p. 1217–1225.
- DESCARTES, René, *Principia philosophiae*, Amsterdam, Ludovicum Elzevirium, 1644.
- DICKE, Robert, “Gravitation and the Universe”, *Memoirs of the American Philosophical Society, Jayne Lectures for 1969*, t. 1, Philadelphia, American Philosophical Society, 1970.
- DINGLE, Herbert, “Cosmology and science”, *Scientific American* 195 (1956), p. 224–240.
- DINGLE, Herbert, “On science and modern cosmology (Presidential address)”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 113 (1953), p. 393.
- DOUGLAS, Heather, “Reintroducing prediction to explanation”, *Philosophy of Science* 76.4 (2009), p. 444–463.
- DOUGLAS, Heather et Peter MAGNUS, “State of the Field, Why Novel Prediction Matters”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 44.4 (2013), p. 580–589.
- DOWEK, Gilles, “L’Explosion mémorielle change la donne”, *Pour la science* 433 (2013), p. 27–31.
- DRAY, William, “The historical explanation of actions reconsidered”, *Philosophy and History* (1963), p. 105–135.
- DUHEM, Pierre, *La Théorie physique : son objet, sa structure*, 2e édition (1914), Paris, Vrin, 1906.
- EINSTEIN, Albert, “Considérations cosmologiques sur la théorie de la relativité générale”, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Paris, Seuil, 1993, p. 88–98.
- EINSTEIN, Albert, “Kosmologische Betrachtungen Zur Allgemeinen Relativitätstheorie”, *Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften* (1917), p. 142–152.
- EINSTEIN, Albert, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Einstein œuvres choisies, Seuil, 1993.
- EINSTEIN, Albert, “Remarques critiques sur une solution des équations de la gravitation donnée par M. de Sitter”, *Relativité II*, sous la dir. de Françoise BALIBAR, Seuil, 1993, p. 100–103.
- EINSTEIN, Albert et Willem DE SITTER, “On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 18.3 (1932), p. 213.
- ELLIS, George, “Innovation, resistance and change : the transition to the expanding universe”, *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 97–113.

- ELLIS, George, “Issues in the philosophy of cosmology”, *Philosophy of Physics*, sous la dir. de Jeremy BUTTERFIELD et John EARMAN, Handbook of the Philosophy of Science Series, Elsevier, 2007, p. 1183–1296.
- FELINE, Laura, *Explication scientifique (A)*, 2017, URL : <http://encyclo-philosophie.fr/10992-2/>.
- FINETTI, Bruno de, “La Préviation : ses lois logiques, ses sources subjectives”, *Annales de l’institut Henri Poincaré* 7.1 (1937), p. 1–68.
- FISHER, Ronald, *The Design of experiments*, 8, 1971, New York, Hafner Publishing Company, 1935.
- FLORIDI, Luciano, “Big data and their epistemological challenge”, *Philosophy & Technology* (2012), p. 1–3.
- FORSTER, Malcolm, “Key concepts in model selection : Performance and generalizability”, *Journal of mathematical psychology* 44.1 (2000), p. 205–231.
- FORSTER, Malcolm, “The Debate between Whewell and Mill on the nature of scientific induction”, *Handbook of the History of Logic*, sous la dir. de Dov GABBAY, John WOODS et Akihiro KANAMORI, Elsevier, 2004, p. 10–93.
- FORSTER, Malcolm et Elliott SOBER, “How to tell when simpler, more unified, or less ad hoc theories will provide more accurate predictions”, *British Journal for the Philosophy of Science* 45.1 (1994), p. 1–35.
- FRESNEL, Augustin, *Œuvres complètes d’Augustin Fresnel*, Paris, Imprimerie Impériale, 1866.
- FRIEDMANN, Alexandre, “Über die Krümmung des Raumes”, *Zeitschrift für Physik* 10.1 (1922), p. 377–386.
- GALE, George, “Cosmology : Methodological Debates in the 1930s and 1940s”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d’Edward ZALTA, été 2015, 2015.
- GAMOW, George, “The Evolution of the universe”, *Nature* 162.4122 (1948), p. 680–682.
- GAMOW, George, Ralph ALPHER et Hans BETHE, “The Origin of chemical elements”, *Physical Review, Letters* 73.7 (1948), p. 802–803.
- GINGERICH, Owen et James MACLACHLAN, *Nicolaus Copernicus : Making the Earth a Planet*, Oxford, Oxford University Press, 2005.
- GLYMOUR, Clark, *Theory and evidence*, Princeton, Princeton University Press, 1980.
- GODFREY-SMITH, Peter, “The strategy of model-based science”, *Biology and Philosophy* 21.5 (2006), p. 725–740.
- GOODMAN, Nelson, *Faits, fictions et prédictions*, trad. par Pierre JACOB, 2e édition (1966), Paris, Les Editions de Minuit, 1955.
- GRAIN, Julien et Gauvain LECONTE, “Expliquer et prédire dans le multivers”, *L’Exercice de la pluralité des mondes*, sous la dir. de Sylvie NONY et Alain SARRIEAU, Paris, Adapt Éditions, 2017, p. 135–148.
- GUTH, Alan, “Inflationary universe : A possible solution to the horizon and flatness problems”, *Physical Review D* 23.2 (1981), p. 347.
- GUTH, Alan, *The Inflationary Universe : The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*, Vintage, 1998.

- HACKING, Ian, "Extragalactic Reality : The Case of Gravitational Lensing", *Philosophy of Science* 56.4 (1989), p. 555–581.
- HACKING, Ian, *Representing and Intervening : Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
- HAFF, Peter, "Limitations on Prediction in Geomorphology", THORN, Colin, *The Scientific Nature of Geomorphology*, Bruce Rhoads, 1996, chap. 14.
- HANSON, Norwood, "On the Symmetry Between Explanation and Prediction", *The Philosophical Review* 68.3 (1959), p. 349–360.
- HARKER, David, "Accommodation and Prediction : The Case of the Persistent Head", *British Journal for the Philosophy of Science* 57.2 (2006), p. 309–321.
- HARKER, David, "On the Predilections for Predictions", *British Journal for the Philosophy of Science* 59.3 (2008), p. 429–453.
- HARVEY, James et James FORGHAM, "The Spot of Arago : New relevance for an old phenomenon", *American Journal of Physics* 52.3 (1984), p. 243–247.
- HAWKING, Stephen et George ELLIS, "The cosmic black-body radiation and the existence of singularities in our universe", *The Astrophysical Journal* 152 (1968), p. 25–36.
- HAWTHORNE, James, "Inductive Logic", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, sous la dir. d'Edward ZALTA, Hiver 2014, 2014.
- HEMPEL, Carl, "Aspects of Scientific Explanation", *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*, New York, Free Press, 1965, p. 331–496.
- HEMPEL, Carl, "Deductive-Nomological vs. Statistical Explanation", *Minnesota studies in the philosophy of science* (1962).
- HEMPEL, Carl, "Provisoes : A problem concerning the inferential function of scientific theories", *Erkenntnis* 28.2 (1988), p. 147–164.
- HEMPEL, Carl, "Studies in the Logic of Confirmation (I.)", *Mind* 54.213 (1945), p. 1–26.
- HEMPEL, Carl, "Studies in the Logic of Confirmation (II.)", *Mind* 54.214 (1945), p. 97–121.
- HEMPEL, Carl et Paul OPPENHEIM, "Studies in the Logic of Explanation", *Philosophy of Science* 15.2 (1948), p. 135–175.
- HEY, Anthony, Stewart TANSLEY et Kristin TOLLE, éd., *The Fourth paradigm : data-intensive scientific discovery*, Redmond, Microsoft Research, 2009.
- HITCHCOCK, Christopher et Elliott SOBER, "Prediction Versus Accommodation and the Risk of Overfitting", *The British Journal for the Philosophy of Science* 55.1 (2004), p. 1–34.
- HOGAN, Craig, "Why the universe is just so", *Reviews of Modern Physics* 72.4 (2000), p. 1149.
- HOWSON, Colin, "Accommodation, prediction and Bayesian confirmation theory", *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, 1988, p. 381–392.

- HOWSON, Colin et Allan FRANKLIN, “Maher, Mendeleev and Bayesianism”, *Philosophy of Science* 58.4 (1991), p. 574–585.
- HOWSON, Colin et Peter URBACH, *Scientific Reasoning : The Bayesian Approach*, 3^e éd., Chicago, Open Court, 2006.
- HOYLE, Fred, “A new model for the expanding universe”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 108 (août 1948), p. 372.
- HOYLE, Fred et Allan SANDAGE, “The second-order term in the redshift-magnitude relation”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* (1956), p. 301–307.
- HUBBLE, Edwin, “A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae”, *Proceedings of the National Academy of Science* 15 (1929), p. 168–173.
- INKPEN, Rob et Graham WILSON, “Explaining the past : abductive and Bayesian reasoning”, *The Holocene* 19.2 (2009), p. 329–334.
- JACOBS, Struan, “John Stuart Mill on Induction and Hypotheses”, *Journal of the History of Philosophy* 29.1 (1991), p. 69–83.
- JEBEILE, Julie, “Explication et compréhension dans les sciences empiriques, les modèles scientifiques et le tournant computationnel”, thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2013.
- JEFFREY, Richard, *Subjective probability : The real thing*, Cambridge University Press, 2004.
- KEAS, Michael, “Systematizing the theoretical virtues”, *Synthese* (2017), publication en ligne.
- KERSZBERG, Pierre, *The invented universe : the Einstein-De Sitter controversy (1916-17) and the rise of relativistic cosmology*, New York, Clarendon Press, 1989.
- KEYNES, John Maynard, *A Treatise on Probability*, London, McMillan et co, 1921.
- KHOURY, Justin et al., “Ekpyrotic universe : Colliding branes and the origin of the hot big bang”, *Physical Review D* 64.12 (2001).
- KISTLER, Max, *Causalité et lois de la nature*, Mathesis (Paris, France), Vrin, 2000.
- KISTLER, Max, “La causalité”, BARBEROUSSE, Anouk et Michael COZIC, *Précis de philosophie des sciences*, Paris, Vuibert, 2011, chap. 3, p. 100–140.
- KISTLER, Max, “The Interventionist Account of Causation and Non-Causal Association Laws”, *Erkenntnis* 78.1 (2013), p. 1–20.
- KITCHER, Philip, *The Advancement of Science : Science without Legend, Objectivity without Illusions : Science without Legend, Objectivity without Illusions*, Oxford University Press, 1993, p. 432.
- KOCHANSKI, Zdzislaw, “Conditions and Limitations of Prediction-Making in Biology”, *Philosophy of Science* (1973).
- KRAGH, Helge, *Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton, Princeton University Press, 1996.

- KRAGH, Helge, “Early dynamical world models : A historical review”, *Proceedings of the International Astronomical Union Symposium* 260 (2009), sous la dir. de David VALLS-GABAUD et Alan BOKSENBERG, p. 182–188.
- KRAGH, Helge, “Karl Popper on physical cosmologies”, *Journal of History of Astronomy* 43 (2012), p. 347–350.
- KRAGH, Helge et Robert SMITH, “Who Discovered the Expanding Universe?”, *History of Science* 41 (2003), p. 141–162.
- KRUGER, Lorenz, Lorraine DASTON et Michael HEIDELBERGER, *The Probabilistic revolution, Vol. 1 : Ideas in history ; Vol. 2 : Ideas in the sciences*, The MIT Press, 1987.
- KUHN, Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*, trad. par Laure MEYER, Flammarion, 1962.
- KUHN, Thomas, “Objectivité, jugement de valeur et choix d’une théorie”, *La Tension essentielle*, trad. par Pierre JACOB, Paris, 1990, p. 424–449.
- KUHN, Thomas, “Objectivité, jugement de valeur et choix d’une théorie”, *La tension essentielle : tradition et changement dans les sciences*, Bibliothèque des sciences humaines, Paris, France, Gallimard, 1990, p. 424–450.
- KUHN, Thomas, “The Essential tension”, Chicago, Chicago University Press, 1977, chap. Objectivity, value judgment, and theory choice, p. 320–339.
- LADYMAN, James et Don ROSS, *Every Thing Must Go : Metaphysics Naturalized*, Oxford, Oxford University Press, 2009.
- LAKATOS, Imre, *Histoire et méthodologie des sciences*, trad. par Catherine MALAMOUD, Paris, Presses Universitaires de France, 1994.
- LAKATOS, Imre, *The Methodology of scientific research programmes*, t. 1, Cambridge, Cambridge University Press, 1980.
- LAKATOS, Imre et Élie ZAHAR, “Why did Copernicus’s research programme supersede Ptolemy’s?”, *Philosophical papers I*, New York, Cambridge University Press, 1980, p. 168–192.
- LANGE, Marc, “The Apparent Superiority of Prediction to Accommodation as a Side Effect : a Reply to Maher”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 52.3 (2001), p. 575–588.
- LAPLACE, Pierre-Simon et Antoine LAVOISIER, *Mémoire sur la chaleur*, Paris, Gauthier-Villars, 1780.
- LAUDAN, Larry, “A Confutation of Convergent Realism”, *Philosophy of Science* 48.1 (1981), p. 19–49.
- LAUDAN, Larry, “William Whewell on the Consilience of Inductions”, *The Monist* 55.3 (1971), p. 368–391.
- LAVOISIER, Antoine, *Traité élémentaire de chimie*, Paris, Chez Cuchet, 1789.
- LAYMON, Ronald, “Scientific realism and the hierarchical counterfactual path from data to theory”, *PSA : proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association*, 1982, p. 107–121.
- LE VERRIER, Urbain, “Recherches sur les mouvements d’Uranus”, *Comptes rendus de l’Académie des sciences* 22 (séance du 1er juin 1846), p. 907–918.

- LECOUTRE, Bruno, “Pourquoi les méthodes bayésiennes sont-elles si peu utilisées dans les publications expérimentales?”, *Le Bayésianisme aujourd’hui*, sous la dir. d’Isabelle DROUET, Éditions Matériologiques, 2016, chap. 6, p. 194–219.
- LEMAÎTRE, Georges, “A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91.5 (1931), p. 483–490.
- LEMAÎTRE, Georges, *L’Hypothèse de l’atome primitif*, Alençon, Imprimerie Alençonnaise, 1948.
- LEMAÎTRE, Georges, “Note on de Sitter’s universe”, *Journal of Mathematical Physics* 4 (1925), p. 188–192.
- LEMAÎTRE, Georges, “Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques”, *Annales de la Société scientifique de Bruxelles, série A* 47 (1927), p. 49–59.
- LEPLIN, Jarrett, *A Novel Defense of Scientific Realism*, Oxford, Oxford University Press, 1997.
- LEQUEUX, James, *La découverte de Neptune par Le Verrier (1846)*, bibnum, 2010, URL : www.bibnum.education.fr/physique/astrophysique/la-decouverte-de-neptune-1846.
- LEVINS, Richard, “The strategy of model building in population biology”, *American scientist* 54.4 (1966), p. 421–431.
- LEWIS, David, “Counterfactual dependence and time’s arrow”, *Noûs* (1979), p. 455–476.
- LIBBEY, Laura et al., “Another view of the maturity of our science”, *Shore and Beach* 66 (1998), p. 2–4.
- LIDDLE, Andrew, *An Introduction to Modern Cosmology*, 2^e éd., Chichester, Wiley, 2009.
- LIDDLE et LYTH, *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- LIGHTMAN, Alan et Roberta BRAWER, *Origins : The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Harvard, Harvard University Press, 1990.
- LIGO, “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Physical Review Letters* 116 (6 2016), p. 061102.
- LINDE, Andrei, “A new inflationary universe scenario : A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems”, *Physics Letters B* 108.6 (1982), p. 389–393.
- LINDE, Andrei, “Chaotic inflation”, *Physics Letters B* 129.3 (1983), p. 177–181.
- LINDE, Andrei, “Prospects of inflationary cosmology”, *arXiv preprint astro-ph/9610077* (1996).
- LIPTON, Peter, *Inference to the Best Explanation*, 2^e éd., Londres, Routledge, 2004.
- LIPTON, Peter, “Testing Hypotheses : Prediction and Prejudice”, *Science* 307.5707 (2005), p. 219–221.

- LOSEE, John, “Whewell and Mill on the Relation Between Philosophy of Science and History of Science”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 14.2 (1983), p. 113–126.
- LWOFF, André, “The Prophage and I”, *Phage and the Origins of Molecular Biology*, sous la dir. de John CAIRNS, Siegmund STENT et James WATSON, New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007.
- LYNCH, Clifford, “Big data : How do your data grow ?”, *Nature* 455.7209 (2008), p. 28–29.
- LYONS, Timothy, “Scientific Realism and the Stratagema de Divide Et Impera”, *British Journal for the Philosophy of Science* 57.3 (2006), p. 537–560.
- MAHER, Patrick, “Howson and Franklin on Prediction”, *Philosophy of Science* 60.2 (1993), p. 329–340.
- MAHER, Patrick, “Prediction, Accommodation, and the Logic of Discovery”, *PSA : Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988), p. 273–285.
- MÄKI, Uskali, “The Truth of False Idealizations in Modeling”, *Models, Simulations, and Representations*, sous la dir. de Paul HUMPHREYS et Cyrille IMBERT, New York, Routledge, 2011, p. 1–23.
- MATTHEWSON, John, “Trade-offs in model-building : a more target-oriented approach”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 42.2 (2011), p. 324–333.
- MAYO, Deborah, *Error and the Growth of Experimental Knowledge*, Chicago, Chicago University Press, 1996.
- MAYR, Ernst, “Cause and effect in biology : Kinds of causes, predictability, and teleology are viewed by a practicing biologist”, *Science* 134.3489 (1961), p. 1501–1506.
- MCCULLOCH, Eve, “Harnessing the Power of Big Data in Biological Research”, *Bioscience* 63.9 (2013).
- MCMULLIN, Ernan, “Galilean idealization”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16.3 (1985), p. 247–273.
- MERLEAU-PONTY, Jacques, *Cosmologie du XXe siècle : étude épistémologique et historique des théories de la cosmologie contemporaine*, Paris, Gallimard, 1965.
- MERLEAU-PONTY, Jacques, *Sur la science cosmologique : conditions de possibilité et problèmes philosophiques*, Paris, EDP Sciences, 2003.
- MERRILL, George, “Confirmation and Prediction”, *Philosophy of Science* 46.1 (1979), p. 98–117.
- MILL, John Stuart, *Système de logique déductive et inductive : exposé des principes de la preuve et des méthodes de recherche scientifique*, trad. par Louis PEISSE, 6^e éd., t. 2, Paris, Librairie Philosophique de Ladrance, 1866.
- MILLER, Boaz, “What is Hacking Argument for Entity Realism ?”, *Synthese* 193.3 (2016), p. 991–1006.
- MILNE, Edward, *Relativity, Gravitation and World-structure*, New York, Clarendon Press, 1935.

- MISNER, Charles, "Mixmaster universe", *Physical Review Letters* 22.20 (1969), p. 1071–1074.
- MOELLER, Kart, *Optics : Learning by Computing, with Examples Using Maple, MathCad, Matlab, Mathematica, and Maple*, Dordrecht, Springer, 2007.
- MORRISON, Margaret, "Theory, intervention and realism", *Synthese* 82.1 (1990), p. 1–22.
- MURRAY, Brad, "Contrasting the goals, strategies, and predictions associated with simplified numerical models and detailed simulations", *Prediction in geomorphology*, sous la dir. de Peter WILCOCK et Richard IVERSON, American Geophysical Union, 2003, p. 151–165.
- MURRAY, Brad, "Reducing model complexity for explanation and prediction", *Geomorphology* 90.3-4 (2007), p. 178–191.
- MURRAY, Brad et Chris PAOLA, "A cellular model of braided rivers", *Nature* 371.6492 (1994), p. 54–57.
- MUSGRAVE, Alan, "Logical versus Historical Theories of Confirmation", *British Journal for the Philosophy of Science* (1974).
- MUSGRAVE, Alan, "The Ultimate argument for scientific realism", *Relativism and realism in science*, sous la dir. de Robert NOLA, Dordrecht, Springer, 1988, p. 229–252.
- NARLIKAR, Jayant, *An Introduction to Cosmology*, Cambridge University Press, 2002.
- NEY, Alyssa, "Neo-positivist metaphysics", *Philosophical studies* 160.1 (2012), p. 53–78.
- NIINILUOTO, Ilkka, *Critical Scientific Realism*, Oxford, Oxford University Press, 1999.
- NOBELPRIZE.ORG, "*The Nobel Prize in Physics 2008*", 2013, URL : http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/.
- NORTH, John, "The Early years", *Modern cosmology in retrospect*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 11–30.
- ORGOGOZO, Virginie et David STERN, "Is Genetic Evolution Predictable?", *Science* 323.5915 (2009), p. 746–751.
- ORGOGOZO, Virginie et David STERN, "The Loci of evolution : how predictable is genetic evolution?", *Evolution* 62.9 (2008), p. 2155–2177.
- PEIRCE, Charles Sanders, "A Theory of Probable Inference", *Collected papers of Charles Sanders Peirce II*, 1883.
- PENZIAS, Arno et Robert WILSON, "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.", *The Astrophysical Journal* 142 (1965), p. 419–421.
- POINCARÉ, Henri, *La Science et l'hypothèse*, Paris, Champs-Flammarion, 1902.
- POPPER, Karl, *Misère de l'historicisme*, Paris, Plon, 1956.
- POPPER, Karl, "Natural Selection and the Emergence of Mind", *Dialectica* 32 (1978), p. 339–355.
- POPPER, Karl, *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, Londres, 1959.
- POPPER, Karl, *The Open Universe : An Argument for Indeterminism*, Londres, Routledge, 1988.

- POPPER, Karl, *Unended Quest : An Intellectual Autobiography*, 2^e éd., Londres, Routledge, 1976.
- PORTER, Theodore, *The Rise of statistical thinking, 1820-1900*, Princeton, Princeton University Press, 1986.
- PSILLOS, Stathis, “Living with the abstract : realism and models”, *Synthese* 180.1 (2011), p. 3–17.
- PSILLOS, Stathis, *Scientific realism : How science tracks truth*, Londres, Routledge, 1999.
- PUTNAM, Hilary, *Philosophical Papers : Mathematics, Matter and Method*, Cambridge, Cambridge University Press, 1975.
- QUINE, Willard, “On empirically equivalent systems of the world”, *Erkenntnis* 9.3 (1975), p. 313–328.
- REES, Martin, *Just Six Numbers : The Deep Forces that Shape the Universe*, New York, Basic Books, 1999.
- RESCHER, Nicholas, *Predicting the Future : An Introduction to the Theory of Forecasting*, New York, State University of New York Press, 1998.
- RESCHER, Nicholas, “The stochastic revolution and the nature of scientific explanation”, *Synthese* 14.2 (1962), p. 200–215.
- ROBERTSON, Howard, “On relativistic cosmology”, *The Philosophical Magazine and Journal of Science* 5.31 (1928), p. 835–848.
- ROBERTSON, Howard, “Relativistic Cosmology”, *Reviews of Modern Physics* 5.1 (1933), p. 62.
- ROTHMAN, Tony et George ELLIS, “Has cosmology become metaphysical?”, *Astronomy* 15 (1987), p. 6–21.
- RUPHY, Stéphanie, *Pluralismes scientifiques : enjeux épistémiques et métaphysiques*, Paris, Hermann, 2013.
- RUSSELL, Bertrand, *Religion and Science*, Oxford, Oxford University Press, 1935.
- RUSSELL, Bertrand, *Science et religion*, trad. par Philippe-Roger MANTOUX, Paris, Gallimard, 1935.
- SAATSI, Juha, “Historical Inductions, Old and New”, *Synthese* (2017), publication en ligne.
- SAATSI, Juha, “Reconsidering the Fresnel-Maxwell Theory Shift : How the Realist can Have her Cake and EAT It Too”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 36.3 (2005), p. 509–538.
- SAATSI, Juha et Peter VICKERS, “Miraculous success? Inconsistency and untruth in Kirchhoff’s diffraction theory”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 62.1 (2010), p. 29–46.
- SALMON, Wesley, “Four decades of Scientific Explanation”, *Minnesota Studies for Philosophy of Science* 8 (1989), p. 3–220.
- SANDAGE, Allan, “The Ability of the 200-INCH Telescope to Discriminate Between Selected World Models.”, *The Astrophysical Journal* 133 (1961), p. 355–371.
- SCERRI, Eric et John WORRALL, “Prediction and the Periodic Table”, *Studies in History and Philosophy of Science* 32.3 (2001), p. 407–452.

- SCHEFFLER, Israel, "Explanation, prediction, and abstraction", *The British Journal for the Philosophy of Science* 7.28 (1957), p. 293–309.
- SCIAMA, Dennis, "L'observation et la cosmologie", *Annales de l'IHP* 17 (1961), p. 25–36.
- SCIAMA, Dennis et Martin REES, "Cosmological Significance of the Relation between Red-shift and Flux Density for Quasars", *Nature* 211 (1966), p. 1283.
- SCRIVEN, Michael, "Explanation and Prediction in Evolutionary Theory", *Science* 130.3374 (1959), p. 477–482.
- SCRIVEN, Michael, "Explanations, predictions, and laws", *Minnesota studies in the philosophy of science* 3 (1962), p. 170–230.
- SMART, John, *Philosophy and Scientific Realism*, Londres, Routledge & Kegan Paul, 1963.
- SMEENK, Chris, "False vacuum : Early universe cosmology and the development of inflation", *The universe of general relativity*, Springer, 2005, p. 223–257.
- SMEENK, Chris, "Inflation as a Theory of Structure Formation", *Beyond Einstein*, sous la dir. de D. ROWE, Boston, Birhauser, 2012.
- SMEENK, Chris, "Predictability crisis in early universe cosmology", *Studies in History and Philosophy of Science Part B : Studies in History and Philosophy of Modern Physics* (2013).
- SMOOT, George et al., "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps", *The Astrophysical Journal* 396 (1992), p. L1–L5.
- SOBER, Elliott, "Two outbreaks of lawlessness in recent philosophy of biology", *Philosophy of Science* 64 (1997), p. 458–467.
- STANFORD, Kyle, *Exceeding our grasp : Science, history, and the problem of unconceived alternatives*, Oxford, Oxford University Press, 2006.
- STANFORD, P. Kyle, "Author's Response", in 'Grasping at Realist Straws', a Review Symposium of Stanford (2006)", *Metascience* 18 (2009), p. 355–390.
- STAROBINSKY, Alexei, "A new type of isotropic cosmological models without singularity", *Physics Letters B* 91.1 (1980), p. 99–102.
- STEINHARDT, Paul, "L'inflation cosmique en débat", *Pour La Science* (2014).
- STERN, David, *Evolution, Development, and the Predictable Genome*, Yosemite, Roberts & Company Publishers, 2010.
- SULLIVAN, Woodruff, "The entry of radio astronomy into cosmology : radio stars and Martin Ryle's 2C survey", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 309–330.
- TENNANT, Neil, "The logical structure of scientific explanation and prediction : planetary orbits in a Sun's gravitational field", *Studia Logica* 95.1 (2010), p. 207–232.
- THOM, René, *Prédire n'est pas expliquer*, Champs-Flammarion, 1999.
- TOURNÈS, Dominique, "L'intégration approchée des équations différentielles ordinaires (1671-1914)", thèse de doct., Université Paris 7 Denis Diderot, 1996.

- TURNER, Derek, “Local Underdetermination in Historical Science”, *Philosophy of Science* 72.1 (2005), p. 209–230.
- VALLS-GABAUD, David et Alexander BOKSENBERG, “The Role of astronomy in society and culture”, *Proceedings of the International Astronomical Union* 5.260 (2009), p. 4–8.
- VAN FRAASSEN, Bas, *The Scientific Image*, Oxford, Oxford University Press, 1980.
- VANCHURIN, Vitaly, Alexander VILENKIN et Serge WINITZKI, “Predictability crisis in inflationary cosmology and its resolution”, *Physical Review D* 61.8 (2000).
- VICKERS, Peter, “A Confrontation of Convergent Realism”, *Philosophy of Science* 80.2 (2013), p. 189–211.
- VICKERS, Peter, “Towards a realistic success-to-truth inference for scientific realism”, *Synthese* (2016), publication en ligne.
- VICKERS, Peter, *Understanding Inconsistent Science*, Oxford, Oxford University Press, 2013.
- VICKERS, Peter, “Understanding the selective realist defence against the PMI”, *Synthese* (2016), publication en ligne.
- VICKERS, Peter, “Was Newtonian cosmology really inconsistent?”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 40.3 (2009), p. 197–208.
- VILENKIN, Alexander, “Anthropic predictions : the case of the cosmological constant”, *Universe or Multiverse ?*, sous la dir. de Bernard CARR, Cambridge, Cambridge University Press, 2007, p. 163–179.
- VON SEELIGER, Hugo, “Über das Newton’sche Gravitationsgesetz”, *Astronomische Nachrichten* 137 (1895), p. 129–136.
- VORMS, Marion, “Théories, modes d’emploi. Une perspective cognitive sur l’activité théorique dans les sciences empiriques”, thèse de doct., Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2009.
- VOTSIS, Ioannis, “The prospective stance in realism”, *Philosophy of Science* 78.5 (2011), p. 1223–1234.
- WAGNER, Pierre, *Carnap’s Ideal of Explication and Naturalism*, Houndmills, Palgrave Macmillan, 2016.
- WAGNER, Pierre, “Carnap’s Theories of Confirmation”, *Explanation, Prediction, and Confirmation*, sous la dir. de D. DIEKS et al., Dordrecht, Springer, 2011.
- WAGNER, Pierre, *Définition (A)*, 2017, URL : <http://encyclo-philos.fr/definition-a-2/>.
- WAGONER, Robert, William FOWLER et Fred HOYLE, “On the synthesis of elements at very high temperatures”, *The Astrophysical Journal* 148 (1967), p. 3.
- WANG, Yen Lee, “Akaike’s Theorem and Weak Predictivism in Science”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 44.4 (2013), p. 594–599.
- WEINBERG, Steven, “A priori probability distribution of the cosmological constant”, *Physical Review D* 61.10 (2000), p. 103505.
- WEINBERG, Steven, *Dreams of a final theory*, Pantheon Books, 1992.

- WEINBERG, Steven, *Gravitation and cosmology : principles and applications of the general theory of relativity*, Wiley, 1972.
- WEISBERG, Michael, "Forty years of "The strategy" : Levins on model building and idealization", *Biology and Philosophy* 21.5 (2006), p. 623–645.
- WHEWELL, William, *Novum organon renovatum*, Londres, J. W. Parker & son, 1858.
- WHITROW, Gerald et Hermann BONDI, "Is physical cosmology a science?", *The British Journal for the Philosophy of Science* 4.16 (1954), p. 271–283.
- WILCOCK, Peter et Richard IVERSON, "Prediction in geomorphology", *Prediction in geomorphology*, sous la dir. de Peter WILCOCK et Richard IVERSON, American Geophysical Union, 2003, p. 3–11.
- WILLIAMS, Mary, "Deducing The Consequences Of Evolution : A Mathematical Model", *Journal of Theoretical Biology* 29.3 (1970), p. 343–385.
- WILLIAMS, Mary, "Falsifiable Predictions of Evolutionary Theory", *Philosophy of Science* 40.4 (1973), p. 518–537.
- WILLIAMS, Mary, "The Importance of Prediction Testing in Evolutionary Biology", *Erkenntnis* 17.3 (1982), p. 291–306.
- WILLIAMS, Mary, "The Logical Status Of The Theory Of Natural Selection And Other Evolutionary Controversies", *The Methodological Unity of Science* (1973), p. 343–385.
- WILSON, Robert, "Discovery of the cosmic microwave background", *Modern cosmology in retrospect*, sous la dir. de Bruno BERTOTTI, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, p. 291–308.
- WINTHER, Rasmus, "Prediction in Selectionist Evolutionary Theory", *Philosophy of Science* 76 (2009), p. 889–901.
- WOODWARD, Jim, "Experimentation, causal inference and instrumental realism", *The Philosophy of Scientific Experimentation*, sous la dir. d'Hans RADDER, University of Pittsburgh Press, 2003, p. 97–118.
- WORRALL, John, "Fresnel, Poisson and the white spot : the role of successful predictions in the acceptance of scientific theories", *The Uses of Experiment, Studies in the natural sciences*, sous la dir. de David GOODING, Trevor PINCH et Simon SCHAFFER, Cambridge, Cambridge University Press, 1989, p. 135–157.
- WORRALL, John, "Prediction and accommodation revisited", *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 45 (2014), p. 54–61.
- WORRALL, John, "Structural Realism : The Best of Both Worlds?", *Dialectica* 43.2 (1989), p. 99–124.
- WRAY, Brad, "Selection and Predictive Success", *Erkenntnis* 72.3 (2010), p. 365–377.
- ZAHAR, Elie, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (I)", *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.2 (1973), p. 95–123.
- ZAHAR, Elie, "Why did Einstein's Programme supersede Lorentz's? (II)", *The British Journal for the Philosophy of Science* 24.3 (1973), p. 223–262.
- ZAHAR, Elie et John WORRALL, *Poincaré's Philosophy : From Conventionalism to Phenomenology*, Chicago, Open Court, 2001.

L'activité prédictive des sciences empiriques – analyse d'un succès scientifique et de sa portée

Résumé. La réalisation de prédictions précises et surprenantes est une pratique essentielle des sciences empiriques et la confirmation de ces prédictions semble représenter l'un de leurs principaux succès théoriques et pratiques. Ainsi de nombreux scientifiques et épistémologues attribuent-ils aux succès prédictifs le pouvoir de confirmer des hypothèses, d'influencer le cours de l'histoire scientifique, voire de révéler quelles théories reflètent la réalité. Pourtant les prédictions s'appuient souvent sur des représentations simplifiées, idéalisées ou fictionnelles de la réalité. L'objectif de cette thèse est d'analyser l'activité prédictive pour comprendre en quoi consistent les succès prédictifs et quelle portée on peut légitimement leur conférer. L'enjeu de cette analyse est notamment de savoir si une théorie ayant engendré un succès prédictif peut être considérée comme vraie ou partiellement vraie.

La première partie de la thèse est consacrée à l'analyse de l'activité prédictive et conclut qu'il existe une pluralité de raisonnements et de succès prédictifs. La deuxième partie étudie l'influence de ces succès sur l'évolution d'une discipline, la cosmologie, de 1917 à nos jours et montre que les scientifiques attribuent de l'importance aux prédictions qui indiquent la capacité prédictive d'une hypothèse ou d'une théorie. Dans la troisième partie, je soutiens que le rôle des prédictions dans le choix rationnel des hypothèses est de permettre de juger de leur fécondité. La quatrième partie étudie les limites de la portée des succès prédictifs en montrant qu'ils ne permettent pas de savoir quels aspects des théories dont ils sont issus reflètent la réalité.

The predictive activity of empirical sciences – structure and consequences of a scientific success

Abstract. Deriving precise and surprising predictions is a key feature of scientific activity. The confirmation of these predictions by severe tests seems to represent major theoretical and practical successes in the field of empirical sciences. Therefore, many scientists and philosophers of science view predictive successes as having an important weight in scientific change, theory choice and for the identification of true claims about reality. However, predictions are often derived from simplified or idealised representations of real-world systems. The aim of this dissertation is to analyse the predictive activity of empirical sciences in order to circumscribe the scope of predictive success. First, I claim that predictive successes come in many forms and structures. In the second part, I investigate the impact of successful predictions in the history of modern cosmology since 1917 and argue that scientists value predictions attesting the predictive capacity of new hypotheses. In a third part, I examine the weight of successful predictions in the confirmation of hypotheses and claim that they serve as a proxy for one of the most important virtues of theories: fruitfulness. The last part is dedicated to the limits of scientific successes and shows that novel predictions cannot help us to circumscribe which posits of scientific theories are worthy of belief.

Discipline : Philosophie

Mots clés : Philosophie générale des sciences, histoire des sciences, philosophie de la cosmologie, prédiction, capacité prédictive, réalisme scientifique, théorie de la confirmation, argument du miracle.

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 12 place du Panthéon, 75005 Paris.

UFR de Philosophie, 17 rue de la Sorbonne, 75005 Paris.

École Doctorale de Philosophie (ED 280), 1 rue d'Ulm, 75005 Paris.

Équipe d'accueil : Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques (UMR 8590), 13 rue du Four, 75006 Paris.