



Enjeux épistémologiques et ontologiques d'une théorie unificatrice : unité et diversité des sciences

Aurore Poret-Joffrain

► To cite this version:

Aurore Poret-Joffrain. Enjeux épistémologiques et ontologiques d'une théorie unificatrice : unité et diversité des sciences. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Paris Cité, 2022. Français. NNT : 2022UNIP7040 . tel-04190500

HAL Id: tel-04190500

<https://theses.hal.science/tel-04190500>

Submitted on 29 Aug 2023

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.

**ED 623 : Sciences - Savoirs – Éducation
Laboratoire CNRS SPHERE : UMR 7219**

**THESE DE DOCTORAT EN HISTOIRE ET PHILOSOPHIE
DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES**

**Enjeux épistémologiques et ontologiques d’une théorie
unificatrice : unité et diversité des sciences.**

Aurore PORET- JOFFRAIN

Sous la direction de Dominique LAMBERT

Thèse soutenue à Paris le 13/12/2022

Jury constitué de :

Luciano **BOI**, rapporteur, maître de conférences HDR EHESS.

David **DOAT**, examinatrice, maître de conférences Université Catholique Lille.

Dominique **LAMBERT**, directeur, professeur Université Namur.

Valérie **PAUL-BONCOUR**, examinatrice, DR CNRS Université Paris-Est Créteil.

Inès **SAFI**, examinatrice, chargée de recherche CNRS-HDR Université Paris-Saclay.

Anne **STAQUET**, rapporteuse, professeure Université de Mons.

Fabrice **VANDEBROUCK**, examinateur, professeur Université Paris-Cité.

Résumé, mots-clés et titre en français :

Enjeux épistémologiques et ontologiques d'une théorie unificatrice : unité et diversité des sciences.

La quête d'une théorie unificatrice sous-tend des interrogations épistémologiques (modes de construction des connaissances) et ontologiques (conditions et modes d'existence). En introduction, l'unité de la science est rappelée par la même démarche générale, critique et justificative. Mais, l'articulation de toutes les connaissances scientifiques s'avère difficilement envisageable, étant donné la diversité des disciplines et des domaines de recherche émergeant de l'interdisciplinarité. Afin de mettre en lumière cette diversité, la pluralité d'unités est explicitée en fonction d'une diversité de types d'élémentarités et de modèles explicatifs et justificatifs.

Cette thèse est construite en trois parties, et chaque partie explicite un mode d'unification différent selon le mode de cohérence, soit le tout formel, soit un tout expérimental, soit un tout conceptuel, relatif au type d'approche : soit logique, soit instrumental, soit abstrayant par généralisation. La première partie traite de la diversité des sciences exactes. Elle explique comment est construit un tout formel, sa diversité possible de formes et ses limites. La seconde partie mentionne la diversité de processus naturels et expérimentables. Elle met en lumière la nécessaire compréhension des processus complexes, les limites de leur prédictibilité et la diversité de types de systèmes. La troisième et dernière partie mentionne l'apport de la philosophie et de la sociologie pour analyser la construction des connaissances et des représentations en fonction du choix des fondements et des finalités. Elle insiste sur la diversité de positions philosophiques, en philosophie des sciences, soit moniste (reposant sur un fondement unique), soit pluraliste (reposant sur plusieurs fondements, articulés ou non).

Cette diversité explicitée montre qu'une théorie du tout ne serait pas une théorie de tout et qu'elle relève d'un choix philosophique sous-jacent. L'unification est relative au modèle explicatif déterminé par le choix de modes de cohérence (logique et substantiel). Or, plusieurs modèles explicatifs sont nécessaires pour comprendre la diversité phénoménale et nouménale dans le réel, notamment dans les modes d'être au monde : le modèle nomologique de la physique

théorique pour décrire et prédire le comportement de la matière baryonique dans l'univers, le modèle fonctionnaliste (ou modulaire) de la biologie théorique pour décrire et guérir le vivant, le modèle connexionniste (ou computationnel) des neurosciences pour comprendre l'émergence des fonctions cognitives et les programmer dans des robots.

Enfin, plusieurs positions philosophiques peuvent émerger à partir du constat qu'une diversité d'explications scientifiques est nécessaire à la compréhension du fonctionnement complexe du réel : soit un matérialisme qui privilégie le composant, soit un essentialisme qui privilégie cette diversité de fonctionnement, soit un pragmatisme qui privilégie l'action. Mais, ces trois positions sont en fait réductibles à deux : soit une position idéaliste, privilégiant le conceptuel, généralisant, soit une position réaliste, privilégiant le concret et les particularités. Le point de vue réaliste, le nôtre, invite alors à questionner la réalité naturelle, indépendante de l'humain, et la réalité humaine, au mode de vie particulier, avec ses artefacts et son fonctionnement par représentations. Cette thèse aboutit donc sur une nouvelle question philosophique à propos de nos diverses manières de définir notre espèce (naturaliste, écoculturelle, etc.)

Mots-clés :

- Théorie du tout.
- Unification.
- Réductionnisme.
- Pluralisme.
- Diversité disciplinaire.
- Diversité des fondements épistémologiques.
- Diversité des modèles descriptifs, explicatifs et justificatifs.
- Diversité ontologique.
- Diversité de finalités.
- Multifactorialité.
- Ordres de réalité naturel et artéfactuel.
- Imprévisibilité.
- Impréconcevabilité.
- (In-)efficacité-limites des langages formels.

Summary, keywords and title in English:

Epistemological and ontological issues of a unifying theory: unity and diversity of sciences.

The quest for a unifying theory underlies epistemological questions (modes of construction of knowledge) and ontological questions (conditions and modes of existence). In introduction, the unity of science is recalled by the same general, critical and justificative approach. However, the articulation of all scientific knowledge is difficult to envisage, given the diversity of disciplines and fields of research emerging from interdisciplinarity. In order to highlight this diversity, the plurality of units is explained according to a variety of types of elements and explanatory and supporting models.

This thesis is constructed in three parts, and each part expresses a different mode of unification according to the mode of coherence, either the formal whole, an experimental whole, or a conceptual whole, relative to the type of approach: either logical or instrumental, or abstracting by generalization. The first part deals with the diversity of the exact sciences. It explains how a formal whole is constructed, its possible diversity of forms and its limits. The second part mentions the diversity of natural and experimental processes. It highlights the need for understanding complex processes, the limitations of their predictability, and the diversity of types of systems. The third and final part mentions the contribution of philosophy and sociology to analyze the construction of knowledge and representations according to the choice of foundations and purposes. It emphasizes the diversity of philosophical positions in the philosophy of science, either monistic (based on a single foundation) or pluralistic (based on several foundations, articulated or not).

This explicit diversity shows that a theory at all would not be a theory of everything and that it is an underlying philosophical choice. Unification is relative to the explanatory model determined by the choice of modes of coherence (logical and substantial). However, several explanatory models are necessary to understand the phenomenal and noumenal diversity in reality, especially in the modes of being in the world: the nomological model of theoretical

physics to describe and predict the behavior of baryonic matter in the universe, the functional (or modular) model of theoretical biology to describe and cure the living, the connectionist (or computational) model neuroscience to understand the emergence of cognitive functions and program them into robots.

Finally, several philosophical positions can emerge from the observation that a diversity of scientific explanations is necessary to understand the complex functioning of the real: a materialism that favors the component, either an essentialism that favours this diversity of functioning, or a pragmatism that favours action. But, these three positions are in fact reducible to two: either an idealistic position, favouring the conceptual, generalizing, or a realistic position, favouring the concrete and the peculiarities. The realistic point of view, ours, then invites us to question the natural reality, independent of the human, and the human reality, with its particular way of life, with its artifacts and its functioning through representations. This thesis thus leads to a new philosophical question about our various ways of defining our species (naturalist, ecocultural, etc.)

Keywords:

- Theory of everything.
- Unification.
- Reductionism.
- Pluralism.
- Diversity of disciplinary.
- Diversity of epistemological bases.
- Diversity of descriptive, explanatory and supporting models.
- Ontological diversity.
- Diversity of purpose.
- Orders of reality natural and artefactual
- Multifactoriality.
- Unpredictability.
- Unthinkable.
- (In-)efficiency-limits of formal languages.

Remerciements

Je remercie mes parents, Bernadette Poret-Joffrain et Gérard Poret, et Monsieur Dominique Lambert qui, en plus d'être un bon directeur de thèse par ses qualités intellectuelles, fut un modèle par ses qualités humaines.

Je remercie Mesdames Karine Chemla, Soraya Boudia et les membres du service médical de l'université de Paris pour leur aide dans la résolution des difficultés rencontrées lors de ce doctorat, ainsi que Madame Audrey Gers pour ses cours de philosophie pratique.

Je remercie également les comités d'organisation d'évènements auxquels j'ai eu la joie de participer, comme oratrice ou auditrice, notamment les colloques internationaux de philosophie de la Nature impulsés par Odile et Miguel Espinoza, les conférences du Festival de Fleurance créées par Hubert Reeves, les conférences publiques de l'Académie des Sciences, la vulgarisation scientifique itinérante de l'association Spacebus, les animations de la Fête de la science réalisées sous l'égide du Ministère de l'enseignement supérieur, de la Recherche et de l'innovation, les cours dispensés par l'Observatoire de Paris, le Collège de France, l'université de Saclay, l'ENS de Lyon et l'université de Genève. La liste n'est pas exhaustive.

Table des matières

Introduction générale de la thèse. La diversité interne à la science et ses filiations	11

PARTIE I.

LA DIVERSITE DES SCIENCES EXACTES : SCIENCES FORMELLES ET SCIENCES EMPIRICO-FORMELLES

Introduction de la partie I.

Une notion commune à la diversité des sciences : la scientificité.....	19

CHAPITRE 1. Les systèmes symboliques des *sciences formelles*.

Introduction du chapitre 1.

L'unité des sciences formelles : la méthode de justification déductive.....	23

1. La déduction, la logique et le raisonnement.....	24
2. L'idée d'un tout mathématique.....	31
3. L'unification par l'axiomatique en mathématiques et le formalisme en physique.....	38
4. Les notions de continu et discontinu en mathématiques et en physique.....	41

Conclusion du chapitre 1.

Une diversité de combinatoires en fonction d'un type de système.....	46

CHAPITRE 2. Les limites formelles d'une théorie de tout.

Introduction du chapitre 2. Les limites du formalisme	48

1. Les fondations rationnelles	49
2. Les limites de la modélisation : la diversité des possibles	50
3. L'incomplétude d'une théorie : de l'indécidable et de l'indémontrable.	54
4. La nature de cette théorie en question : l'hypothèse algorithmique	55
5. La limite d'une théorie et le théorème central-limite	56

Conclusion du chapitre 2.

Fondements, efficacité et philosophie des mathématiques et de la logique	59

CHAPITRE 3. Les systèmes observationnels des sciences empirico-formelles :
des connaissances associant expérimentation et théorie.

Introduction du chapitre 3. L'unité des sciences empirico-formelles :

La méthode de justification hypothético-déductive.	62
1. La preuve par l'expérience.....	63
2. L'expérience relative à l'hypothèse et la notion de crédibilité	66
3. L'hypothèse formulée dans un langage et la place de l'interprétation.	69
4. Le langage mathématique et son usage dans les sciences physiques.....	72
Conclusion du chapitre 3. Une unification instrumentale.....	73

Conclusion de la partie I.

La diversité de systèmes de sciences et d'objets élémentaires est-elle résorbable dans une théorie générale des systèmes ?	75

PARTIE II.

UNE DIVERSITE DE PROCESSUS NATURELS :
LES SCIENCES EMPIRICO-FORMELLES ET LES SCIENCES HUMAINES

Introduction de la partie II.

L'objet de recherche en fonction d'une élémentarité et la diversité de structures.....	78

CHAPITRE 1. Les sciences de l'univers par l'unification de la physique.

Introduction du chapitre 1.

Que signifie une unification de la physique et... par la physique ?	81
1. Une unité souvent brisée : physique des interactions fondamentales.....	86
2. Une unification à grande échelle : relativité générale et cosmologie.....	94
3. L'unification problématique de la mécanique quantique et de la relativité générale : Des formalismes inconciliables ?.....	99
4. La philosophie de la renormalisation :	
L'unité est-elle nécessairement fondée sur « une » loi fondamentale ?	103
Conclusion du chapitre 1. Ce qui échappe à l'unification physique.....	109

CHAPITRE 2. Les sciences du vivant par niveaux de complexité.

Introduction du chapitre 2. Le lien entre la physique et la biologie :

L'élémentarité du vivant par la biologie moléculaire.....	113
1. La diversité des formes de vie et leur filiation	120
2. L'émergence d'un organisme selon les modes de reproduction.....	130
3. Le fonctionnement des facultés : les organes et les sens reliés au cerveau.	136
Conclusion du chapitre 2. La notion de fonction, en biologie théorique, et celle unificatrice de système complexe.....	144

CHAPITRE 3. Les sciences de l'esprit : les processus d'individuation.

Introduction du chapitre 3.

De l'individualité biologique à l'individualité psychique et historique	159
1. La conscience relative au fonctionnement neuronal et aux neurotransmetteurs.....	163
2. La perception et la diversité d'intelligences.....	172
3. La construction identitaire en fonction des rapports avec autrui.....	176
Conclusion du chapitre 3. Des neurosciences à la philosophie de l'esprit	182

Conclusion de la partie II.

Une diversité de modèles explicatifs et justificatifs nécessaires.	185

PARTIE III.

LES FONDEMENTS ET LES FINALITES DES SCIENCES : DE LA REALITE NATURELLE A LA REALITE ARTEFACTUELLE

Introduction de la partie III.

Objectivisation de la réalité naturelle à la réalité humaine.....	190

CHAPITRE 1. Une diversité possible de fondements.

Introduction du chapitre 1. La notion de concept	192
1. L'idéalisme, l'idée comme fondement : l'influence platonicienne	196
2. L'essentialisme, l'élémentarité comme fondement : l'influence leibnizienne	199

3. Le pragmatisme, l'action comme fondement : l'apport de la pensée Blondélienne.....	202
4. Le matérialisme, le concret comme fondement, et les ordres de réalité.....	216
Conclusion du chapitre 1. La quête de réalité limitée par l'imprévisible.....	220

CHAPITRE 2. Les finalités des sciences.

Introduction du chapitre 2. Les finalités du progrès et de l'innovation	222
1. La liberté d'action : le moteur du progrès	224
2. Des savoir-faire aux usages : techniques, technologies et responsabilités.....	229
3. Des façons de faire à l'intention : ingénieries et projets de société.....	231
4. Les processus de décision individuels et collectifs	237
Conclusion du chapitre 2.	
La pratique individuelle de la science en fonction de valeurs et sa pratique collective en fonction d'un modèle politique, économique et social.	246

Conclusion de la partie III. L'alternative philosophique :

la totalisation en fonction d'un principe ou la description des effets émergents.....	249

Conclusion générale de la thèse. De la diversité des savoirs à la diversité des finalités :

la diversité des possibilités humaines, dont celle de se représenter le monde.....	253

Bibliographie	272

Annexes

Annexe I. Les modèles et théories	312
Annexe II. Sur la connaissance	313
Annexe III. Les tables de vérité	314
Annexe IV. La synthèse des contre arguments sur une théorie ultime du tout.....	317
Annexe V. L'argument de Grim.	321
Annexe VI. La filiation entre la diversité des savoirs scientifiques	322
Annexe VII. La diversité nécessaire des explications.....	323
Annexe VIII. La diversité des évolutions : prédictibilité et contingence.	329
Annexe IX. La diversité des courants philosophiques et leur apport particulier	335
Annexe X. La spécificité de la chimie et la diversité des modes d'organisation	347
Annexe XI. Des précisions terminologiques à la demande du jury.....	351
Portfolio : Acquisition, production et diffusion de connaissances durant la thèse	363

« La vie a une valeur en elle-même. »

Erwin Schrödinger.

Introduction générale de la thèse.

La diversité interne à la science et ses filiations.

En réfléchissant sur l'idée d'une théorie abusivement nommée « théorie du tout », nous nous sommes demandé en quoi elle serait unificatrice. En fait, elle ne serait unificatrice que d'une discipline, la physique, et non pas de la science, en général, qui comporte de nombreuses disciplines. Dès lors, pour traiter des enjeux épistémologiques et ontologiques de la recherche d'une théorie unificatrice en physique, nous avons décidé de décrire comment se manifeste la diversité interne à la science, puis, de dégager ce qui relève d'une connaissance scientifique proprement dite et ce qui appartient à une interprétation philosophique. Cette clarification montrera que la science possède une grande diversité de méthodes pratiques permettant de construire des connaissances rationnelles et de justifier leur lien au réel.

Dans une première partie, nous verrons que les connaissances peuvent se rapporter à un champ d'abstraction ou au réel empirique. Dans le premier cas, les connaissances appartiennent à la catégorie des sciences formelles et, dans le second, les connaissances appartiennent à la catégorie des sciences empirico-formelles. La différence entre ces deux catégories relève de la méthode d'acquisition des connaissances, qui en détermine leur nature. La méthode des sciences formelles est uniquement fondée sur la cohérence interne de formalismes, alors que celle des sciences empirico-formelles est fondée sur des modèles explicatifs et des théories visant à décrire les phénomènes observés dans le réel. Dans cette première partie, nous expliquons donc comment fonctionnent ces deux catégories.

Dans une seconde partie, nous décrivons la diversité qui se manifeste aussi au sein des sciences empirico-formelles par leur variété disciplinaire. En effet, il existe une diversité d'objets de recherche et chaque discipline possède son propre objet. Nous mentionnons donc deux exemples de disciplines : la physique, science de la matière et de l'univers, et la biologie, science du vivant. Puis, en décrivant chacune de ces deux disciplines, nous montrons que la

diversité est aussi présente au sein de la discipline elle-même. Nous montrons que la variété des branches d'une discipline est relative à ce qui est observé et à la technique d'observation qui progresse avec l'apparition de nouveaux instruments.

Ensuite, l'objet observé est bien souvent décrit dans un premier temps par un modèle, par exemple, le modèle de l'atome.¹ Mais, les modèles sont variés (modèles de l'atome, modèles d'univers, etc.) et la discipline cherche à articuler la diversité des modèles qu'elle étudie dans des théories globales souvent soutenues par un formalisme mathématique. Ainsi, la physique décrit des lois, diverses, dans des théories totalement mathématiques. La biologie décrit des formes de vie et leur filiation par d'autres théories, qui ne sont pas forcément mathématisées, exprimant l'ensemble de ses objets propres (cellule, gène, neurone) en termes de systèmes complexes.

En décrivant, d'une part, une partie de la diversité disciplinaire des sciences formelles, dont l'unité réside dans la méthode de justification, déductive, et d'autre part, la diversité disciplinaire des sciences empirico-formelles, dont l'unité réside dans la méthode de justification hypothético-déductive, nous tenterons de montrer comment se manifeste la diversité des sciences. Même si cette diversité des sciences s'observe donc effectivement dans la diversité des disciplines, correspondant aussi à une diversité d'objets de recherche et de nomenclatures, le pluralisme scientifique est une position philosophique qui ne fait pas l'unanimité. En effet, le pluralisme scientifique est surtout représenté par Stéphanie Ruphy, auteure d'un ouvrage du même nom et d'autres sur la question. (Ruphy 2013) Cette astrophysicienne et philosophe des sciences explique le point de vue opposé au pluralisme dans un document synthétique (Ruphy 2013) sur les manières de tenter une unification des sciences : les thèses linguistiques (Cercle de Vienne), sociologiques (Dewey, Bourdieu), méthodologiques (découverte, logique de justification, unité instrumentale, notamment défendue par Hacking et Galison) et structurales (interconnexion, réductionnisme, monisme taxonomique).

Toutefois, les différentes manières de penser l'unité des sciences (langage, méthode, articulation logique) illustre de fait la pluralité interne à la science, puisque plusieurs éléments sont nécessaires pour construire la science. En effet, d'une part, la science nécessite l'utilisation d'un langage, afin d'exprimer sa connaissance. Or, il peut être mathématique dans les sciences exactes et non-mathématique dans les Sciences Humaines et Sociales (SHS). D'autre part, la

¹ Cf. Annexe I. Les modèles et théories.

méthode scientifique est relative au domaine (axiomatique, formalisme, enquête de terrain, ...). De plus, les connaissances scientifiques qui émergent des disciplines sont variées soit quantitatives ou qualitatives, soit abstraites ou empiriques, etc.

Par ailleurs, l'articulation logique relève du choix d'un principe, de présupposés qui lui ne sont pas nécessairement justifiés scientifiquement. Enfin, les connaissances scientifiques augmentent, en particulier grâce à l'apparition de nouvelles techniques et de nouveaux instruments. La connaissance scientifique est donc évolutive et sa description est fonction d'un contexte historique et sociétal dont l'évolution est « impréconcevable » (Kauffman 2021).

Face à cette diversité, la possible unification des connaissances est donc profondément questionnée.² Nous verrons donc ce qui caractérise d'une manière générale la démarche scientifique, puis ce qui rassemble les différents domaines. En premier lieu, une des caractéristiques communes aux sciences exactes (sciences formelles et sciences empirico-formelles) est la mathématisation totale ou partielle de leurs connaissances. Les mathématiques permettent donc de penser un fondement de l'unification. De plus, d'un point de vue logique, cette diversité disciplinaire est pensable par l'emboîtement des objets décrits. L'univers contient ou est fait de matière et le vivant est constitué de matière. Il y a donc un lien de dépendance du vivant à la matière. Cette logique permet de penser l'unification à partir du concept d'émergence temporelle, où le vivant provient d'une histoire enracinée dans la matière, et où la pensée s'enracine dans le vivant.

Les disciplines scientifiques, celles des sciences exactes, sont donc « articulables », elles peuvent être mises en relation, en système. Cependant, elles ne sont pas réductibles les unes aux autres. Par exemple, la justification profonde de la notion de fonction en biologie, et son apparition à un moment donné de l'histoire du vivant, car le vivant est difficilement réalisable à partir d'une théorie physique a priori. Nous mettrons donc en valeur les effets émergents selon le mode d'existence et les niveaux de réalité, montrant que des disciplines différentes peuvent être profondément reliées, articulées, sans devoir être nécessairement réduites les unes aux autres.

Dans le vivant émerge des fonctions qui ne sont pas présentes dans la matière non-vivante, comme ses capacités sensibles et cognitives. Ces nouveaux fonctionnements (cellulaire, neuronal, etc.) peuvent alors être décrits formellement par le recours aux mathématiques et à

2. Cf. Annexe II. Sur la connaissance.

l'informatique. Mais, dans certains cas, il s'agit encore d'une sorte de réduction, puisque ces descriptions ne considèrent pas toutes ces nécessités, comme les composants matériels des objets. Ainsi, par la notion de système complexe, par exemple, il est possible de décrire mathématiquement des objets, tels que les cellules, les neurones et les gènes, mais sans considérer des détails du substrat chimique qui est une des conditions du vivant qui peuvent se révéler décisifs. Cette mathématisation de la biologie conduit à penser l'humain sans sa composition matérielle et son histoire.

Dans ce sens, des perspectives de recherche invitent à postuler qu'il serait possible de transférer son esprit dans un ordinateur. Mais cela néglige le fait que le substrat corporel pourrait jouer un rôle central dans la caractérisation de ce qu'on appelle la pensée ou l'esprit. Cela demande de questionner ici ce qui est entendu par la notion d'esprit de ce point de vue. Nous verrons que les neurosciences, qui associent plusieurs disciplines, sont très productives. Elles permettent de comprendre le lien entre l'activité mentale et l'activité matérielle. Mais, nous verrons aussi que ces descriptions ne suffisent pas à décrire l'individualité et ne permettent pas de décrire la réalité humaine, qui est de l'ordre des sciences humaines et sociales. De plus, les sciences ne peuvent s'interroger sur elles-mêmes et sur leurs applications qu'à partir d'une réflexion philosophique, questionnant leurs fondements et leurs finalités, ce qui sera l'objet de notre dernière partie. Pour comprendre en profondeur ce qu'est, et ce qui anime, la science, il faut donc s'ouvrir à un champ « méta-scientifique » qui appartient à la philosophie.

Avant de commencer cette analyse, procédons à une clarification sémantique. Tout d'abord, l'épistémologie est une discipline qui appartient au domaine de la philosophie. Elle a pour vocation d'étudier, de manière critique, les sciences, leur formation et la construction des connaissances. Plus généralement, la philosophie étudie la diversité des principes et des causes. Elle peut donc analyser ceux de la science, en général, et les comparer au sein d'une diversité de disciplines scientifiques. C'est ce que nous ferons.

Ensuite, la question est : « de quel savoir parle-t-on ? ». Le savoir renvoie soit à la mémoire (pour donner suite à un apprentissage ou à une expérience), soit à la capacité, au savoir-faire, soit à l'accès à la conscience, avoir présent à l'esprit. On distingue donc essentiellement trois catégories de savoirs : les savoirs acquis et transmis, les savoir-faire, les savoirs en rapport à des représentations mentales (les pensées). Le savoir est donc relatif, en partie, à l'éducation et à la culture, qui elle-même prend une diversité de formes.

Par ailleurs, le savoir est relatif à la norme d'une époque et il se décline à travers une pluralité de domaines. Il est possible de distinguer, par exemple, le savoir concernant l'activité scientifique et le savoir relatif à l'activité artistique. Ces activités n'ont à la fois pas les mêmes finalités (découvrir, exprimer) et pas les mêmes types de productions (connaissances, œuvres). Ainsi, il existe une diversité de savoirs en fonction d'une pratique et le savoir n'est pas que scientifique.

Face à la diversité d'activités, la définition que donne le philosophe François Loth dans son article *Ingénierie et responsabilités* (Loth 2013) permet de situer, d'une part, la diversité de l'arborescence philosophique et, d'autre part, la diversité d'arborescence de l'ingénierie et l'intérêt d'une interaction entre ces domaines différents :

« (...) l'ingénierie est divisée en un nombre de branches différentes (ingénierie, mécanique, chimique, nucléaire, informatique, etc., la philosophie se déploie à l'intérieur de domaines variés tels que la logique, l'épistémologie, la métaphysique, l'éthique, l'esthétique, la philosophie du langage, de l'esprit, etc. une contribution de la philosophie à l'ingénierie cherchera quant à elle à s'ouvrir sur la complexité de concepts inhérents au développement de la technologie et de l'ingénierie » .

Cette citation de domaines variés de l'ingénierie invite à signifier sa finalité : concevoir et produire par l'usage d'une diversité de techniques et le recours à divers secteurs industriels. Contrairement à cette finalité, initialement, la science n'a pas d'autre finalité que la connaissance elle-même.

Dès lors, plusieurs questions se posent sur :

- (1) La manière de justifier de ce que l'on connaît à partir des divers modes de justification (preuves, observations, ...)
- (2) La diversité de manières de connaître.
- (3) La diversité de manières de décrire ce que l'on connaît selon la pluralité des langages.
- (4) Nos constructions des descriptions, des modèles produisant les explications.
- (5) L'usage qu'il est fait des connaissances.

Avant d'aborder chacune de ces questions au fil de cette thèse, tout d'abord, il faut réfléchir à l'élément commun face à cette diversité des sciences que nous allons décrire. C'est pourquoi, nous réfléchirons au caractère de scientificité en partant des écrits du logicien et philosophe Jean Ladrière.

La scientificité est ce qui fonde la démarche commune à une diversité de disciplines, chaque discipline apportant des connaissances particulières. Il existe une diversité de disciplines scientifiques dont cette thèse n'a pas pour but d'en établir une liste complète, mais seulement, d'en faire apparaître l'irréductible variété. Cette thèse tentera de dégager les principaux axes de distinction et de filiation entre les disciplines.

De plus, elle rappelle, par la quête d'universalisme de la science, que cette quête ne doit pas dissimuler la diversité des savoirs particuliers. Ainsi, cette thèse tend à montrer en particulier que la physique, associée aux mathématiques, est une discipline scientifique parmi d'autres, apportant une forme de connaissance particulière, mais sans pouvoir prétendre à une connaissance totale. Or, l'appellation de « théorie du tout » prête à confusion, car la physique n'explique pas tout, puisque d'autres disciplines scientifiques expliquent des choses sans nécessairement avoir besoin de la physique.

Le « tout » est relatif à la construction de l'ensemble, qui sous-tend la détermination de parties et d'un élément de cohésion, qui donne une structure à cet ensemble. Il y a donc une diversité possible de « tout ». Nous en verrons trois formes possibles : le « tout de l'univers matériel » décrit par la physique, le « tout vivant » appréhendé par la biologie et le « tout de la pensée » appréhendé par les neurosciences, voire ultimement par la philosophie.

La totalité peut être considérée d'un point de vue logique comme la somme de cette diversité de « tout », qui n'en sont pas au sens strict, par une relation de dépendance non-réciproque :

- La pensée est dans une forme de vie.
- La vie s'enracine dans la matière.
- La matière est le contenu, ou l'étoffe, de l'univers (selon les points de vue considérés).
- L'univers est, par exemple, selon la relativité générale, l'« espace-temps-matière ». Mais, en mécanique classique et quantique, l'espace et le temps ne sont pas matière. Ils constituent un cadre extérieur, un arrière-fond dans lequel évoluent les corps matériels. En relativité, la courbure de l'espace-temps est identifiée à la présence de matière. Dans les autres théories la matière évolue dans un cadre décrit par l'espace et le temps.

Alors, on pourrait être tenté de représenter formellement, par les seules lois physiques, une somme de processus, dont l'explication est partielle, car nous ne pouvons pas nous extraire de l'univers, le décrire comme de l'extérieur. Nous ne pouvons pas être le démon de Laplace : un

observateur extérieur à l'univers, qui le décrit en totalité et dans l'éternité. Par contre, dans l'univers que nous habitons, nous pouvons mesurer des grandeurs et des durées pour décrire les régularités et les changements des phénomènes par la théorisation. D'un point de vue empirico-formel, la théorie permet d'expliquer un ordre de phénomènes à partir d'un principe conceptuel. Mais, il existe une diversité de théories qui ne sont pas nécessairement physiques décrivant divers ordres de phénomènes : matériel, biologique, psychique, sociaux, dont on ne peut prétendre, directement et par principe, qu'elles pourraient être unifiées par une « theory of everything » du genre de celle qu'affectionnent les physiciens.

D'un point de vue philosophique, le réductionnisme, qui émerge directement d'une interprétation possible des connaissances scientifiques, est en pratique inefficace, par exemple, dans l'intégration des connaissances des systèmes complexes. En ce sens, il n'est pas une synthèse de la pensée scientifique, puisqu'elle est basée sur les sciences, qui elles-mêmes ne peuvent justifier et fonder leur unité ultime. Cette position réductionniste est donc philosophique et ne peut justifier et fonder une unification totale des connaissances. La philosophie questionne notamment les fondements de la science, ses limites et finalités. Et, elle-même est concernée par la question de la pluralité des approches et des fondements.

D'une part, remarquons que le savoir philosophique, ou scientifique, n'a pas toujours pour seul moteur la quête désintéressée de la connaissance. La connaissance est aussi un pouvoir, comme le décrit Isabelle Stengers dans son livre *Science et pouvoirs : La démocratie face à la technoscience* (Stengers 1997). La quête de la connaissance peut aussi être un cheminement vers « l'absolu », comme en témoigne les motivations de ceux qui tentent d'arriver à une théorie unique mathématique du tout indépendante des contingences.

D'autre part, concrètement, les connaissances conduisent à des applications. Alors, il s'agit de restituer la science dans sa fonction pragmatique : il s'agit aussi d'une activité humaine, orientée vers l'utilité vers des buts définis par des politiques de recherche, par l'économie... Cependant, elle façonne le monde où nous vivons. Elle interroge donc la notion de progrès, l'apport et les limites de la rationalité, et le monde que nous voulons construire. La science, la technoscience, constituent une activité profondément humaine. Ainsi, la volonté y possède une place déterminante.

Pour étudier celle-ci, nous évoquerons l'analyse blondélienne qui amène à considérer ce qui est en jeu dans la volonté, stimulant l'action, toute l'action. Le réel que construit l'action humaine renferme le monde que le peintre ou le poète traduiront parfois mieux ou autrement que le

savant, ce monde des émotions, mais également ce monde de la décision politique ou éthique, ou encore ce monde du droit, de l'économie ou de la finance ... Autant de facettes des activités et de la vie humaine que l'on pourrait vouloir réduire aux sciences empirico-formelles, mais qui y résistent d'une manière qu'il nous conviendra de préciser dans la suite de ce travail. Car, de fait, ces mondes multiples et variés renferment des événements contingents, des champs de possibles imprédictibles qui résistent à la calculabilité, à la mise en équations ou en algorithmes justement en raison de leur unicité, de leur « a-normalité », de leur irrégularité, de leur « non-universalité »... de ce qui relève de l'historicité et peut-être de la créativité...

PARTIE I.

LA DIVERSITE DES SCIENCES EXACTES : SCIENCES FORMELLES ET SCIENCES EMPIRICO-FORMELLES

Introduction de la partie I.

Une notion commune à la diversité des sciences : la scientificité.

L'objectif de cette première partie est de présenter la **diversité des sciences exactes** en expliquant, dans un premier chapitre, ce que sont les **sciences formelles** et, dans un second chapitre, ce que sont les **sciences empirico-formelles**.

Dans cette première partie, nous allons examiner la construction des connaissances soit par la logique et les mathématiques, les sciences formelles, soit par la logique, les mathématiques et l'expérimentation, les sciences empirico-formelles. La distinction entre ces deux catégories regroupées dans les sciences dites exactes est surtout le recours à l'expérience. Les sciences empirico-formelles recourent à l'expérience car leur objet de recherche est le réel, entendu au sens empirique, car on pourrait penser le réel mathématique, comme dans le platonisme, par exemple. Au contraire, les sciences formelles ne visent pas directement le réel empirique. Les mathématiques entendues comme la science des relations générales, n'est pas forcément mise en correspondance avec un ordre de phénomènes réel. Dès lors, il s'agit tout d'abord d'identifier l'élément commun à cette première diversité interne à la science en la déterminant.

Tout d'abord, la connaissance renvoie à un objet. Rappelons que la connaissance scientifique renvoie à un ensemble d'énoncés cohérents soumis à une procédure de vérification et ayant une prétention de vérité (c'est-à-dire que les énoncés formant la connaissance prétendent

correspondre à un objet réel, à une réalité.). La question est alors de savoir comment s'acquiert la connaissance de cet objet. Le savoir est en partie lié à l'inné, dans le sens où nous possédons des facultés cognitives qui permettent de connaître et de comprendre, et le savoir est aussi acquis. De même, les sciences empirico-formelles procèdent par expérimentation afin de vérifier leurs théories et leur correspondance avec le réel.

La science procède par des constructions mentales (l'élaboration des théories, la formulation d'équations, etc.). Puis, elle fait appel à des expérimentations et s'inscrit dans une continuité en fonction des connaissances précédentes transmises par les générations antérieures de savants. La science est donc aussi une construction historique et humaine. Elle évolue dans le temps. Elle possède une chronologie et elle est fondée sur le doute : l'esprit critique. Dans ce sens, le philosophe et logicien Jean Ladrière définit la science comme « un mode de connaissance critique » (Ladrière 2017). Il justifie l'emploi du mot « critique » de deux façons. D'une part, la science est critique car elle contrôle ses démarches. Elle vérifie ses critères de validation par des méthodes qui « lui permettent d'étendre de façon systématique le champ de son savoir » (Ladrière 2017). D'autre part, la science est critique sur ses fondements.

Ensuite, la science décrit ce qui est, par-delà ce qu'il paraît, en ne se fiant pas à ce qui peut sembler évident. Elle questionne donc les faits observables et les manières de comprendre. Elle dépasse la perception phénoménale donnée par les sens en les prolongeant par les instruments, donnant ainsi une conception plus étendue et plus profonde de ce qui est, et permettant de décrire une diversité de fonctionnements selon son objet d'étude. Ainsi, la science est un pan de la culture transmis à travers des enseignements et faisant intervenir une pluralité de disciplines. Aussi, dans son ouvrage, *Qu'est-ce que la science*, l'épistémologue Alan Chalmers précise justement que son titre est trompeur, car il suggère une unité de la science, « l'existence d'une catégorie unique, la « science » », ce qui amènerait à penser qu'une pratique est soit « à l'intérieur ou à l'extérieur de cette catégorie » (Chalmers 1987). Or, il n'existe pas une unique méthode scientifique, « une conception éternelle et universelle de la science ou de la méthode scientifique » (Chalmers 1987).

En suivant cette idée, nous allons montrer la diversité des méthodes de validation du caractère scientifique d'une connaissance. En effet, la scientificité d'une connaissance repose sur son caractère rationnel justifié par différents moyens. La justification peut être établie soit par la démonstration, la théorisation ou la contextualisation. La démonstration recourt à la logique déductive dans un système formel au sein des sciences uniquement spéculatives. La justification est alors relative à une théorie fondamentale de la discipline. Par exemple, la théorie des

prédicats de 1^{er} ordre en logique ou la théorie des nombres en mathématiques. La théorisation recourt à une logique hypothético-déductive, correspondant à l'adéquation entre une hypothèse et un ordre de phénomènes, par exemple, l'hypothèse que les choses sont dénombrables par leur quantification. En outre, le fondement d'une théorie évolue au fil des réflexions. Ainsi, l'idée de nombre, au départ, relève de l'évidence d'une pluralité de choses qu'il est possible de dénombrer d'une diversité de manières. Puis, au fur et à mesure de la réflexion des mathématiciens sur leur discipline, la notion de nombre a été catégorisée, jusqu'à mener à ce que nous voyons aujourd'hui dans les axiomatiques des nombres naturels, réels, complexes, ... La justification par contextualisation présente un ensemble de faits. Elle fait souvent références à des intuitions spatiales et temporelles qui vont bien au-delà du formel.

Dans ce premier chapitre sur l'unité formelle et la diversité des modes de justification, nous aborderons en premier lieu la justification des connaissances abstraites par la démonstration mathématique. Pour cela, nous commencerons par évoquer la méthode de la démonstration, la déduction, et les questions épistémologiques qu'elle soulève. Puis, après avoir mentionné la diversité de logiques et de raisonnements, nous mentionnerons l'apport de la méthode axiomatique et la théorisation des nombres par catégorie. Puis, nous verrons jusqu'où peut conduire l'hypothèse d'un « tout computationnel ». Ensuite, nous passerons des sciences formelles aux sciences expérimentales. Nous aborderons un autre mode de justification, hypothético-déductif, concernant des connaissances concrètes, où le formalisme est appuyé par une preuve expérimentale. Enfin, nous mentionnerons l'apport des sciences herméneutiques sur la considération du contexte dans la construction de la connaissance, où la signification est relative à un référentiel de temps et de lieu, puisque la connaissance scientifique est évolutive. Grâce aux progrès des sciences et techniques, on sait plus de choses qu'hier et sans doute moins que demain. Une diversité de disciplines se profilent alors dans les sciences-empirico-formelles et leur distinction est possible par l'identification de l'objet de recherche, ce que nous étudierons dans la partie suivante.

Cette première partie permettra de mettre en évidence la diversité de formes de connaissances : abstraites, concrètes, contextuelles. De plus, elle montrera la diversité des manières de justifier ces connaissances, soit par la déduction logico-mathématique, soit en fonction d'une théorie à propos d'un ordre de phénomènes, soit en fonction d'un contexte en situant le cadre (époque et lieu). Cela nous amènera à considérer l'unité mathématique sous-jacente à cette diversité scientifique et caractérisée par la notion d'« exactitude » des sciences du même nom : les sciences exactes ! Les sciences exactes ont souvent recours aux mathématiques, mais le rapport aux mathématiques peut être très différent suivant les disciplines, car les mathématiques ne sont

pas efficaces de la même manière dans tous les champs empiriques. La mathématisation de la physique est signifiée au travers de la notion de loi, qui n'a d'ailleurs pas la même signification et la même portée dans d'autres disciplines, comme le montre la différence entre la « loi » de l'évolution en biologie et les « lois » de Newton en Physique !

CHAPITRE 1.

Les systèmes symboliques des sciences formelles

Introduction du chapitre 1.

L'unité des sciences formelles : la méthode de justification déductive.

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter ce que sont les sciences formelles et sur quoi repose l'unité de cette diversité de disciplines : la méthode déductive.

Tout d'abord, nous nous intéresserons à la signification du terme comprendre et à la notion de raisonnement. Ensuite, nous en viendrons à l'analyse du mode de justification des connaissances rationnelles : la déduction. Puis, nous étudierons les conceptions qui peuvent émerger de la conjugaison de plusieurs sciences formelles, en particulier par l'association des mathématiques et de l'informatique. Nous verrons que cette mise en relation permet de construire des représentations. Cependant, nous remarquerons que le risque est de considérer la représentation pour la chose elle-même. Ainsi, nous marquerons la nécessité de passage de la connaissance scientifique à l'interprétation philosophique en référence à la vérification des présupposés, non totalement scientifiques.

Enfin, face à la diversité des sciences formelles, nous étudierons l'unification des mathématiques par l'association de l'algèbre et de la géométrie et évoquerons la topologie. Et, nous aurons tenté, non pas d'épuiser, mais aussi de souligner l'apport propre de branches des sciences formelles, la logique, les mathématiques et l'informatique, qui elles-mêmes sont encore subdivisibles en catégories, comme en attente d'une unité plus profonde à venir, parce qu'elles présentent parfois des caractéristiques de structure commune, qui font penser (à tort ou à raison) qu'elles pourraient s'unifier. Nous aurons aussi mentionné la tentative d'inclusion, ou de réduction, de la physique aux sciences formelles, ce qui nous conduira au second chapitre consacré à la diversité des sciences empirico-formelles.

1. La déduction, la logique et le raisonnement

Les sciences formelles contiennent « les mathématiques et la logique formalisée » (Ladrière 2017). Un système formel est de nature abstraite. Selon le philosophe et logicien Jean Ladrière, ce système de type formel « permet d'engendrer une classe de propositions (formulées dans un langage donné) à partir de deux types de spécification : celle d'une sous-classe déterminée de la classe en question (formée des axiomes) et celle d'un certain nombre de règles de déduction » (Ladrière 2017). Il s'agit donc d'un langage qui engendre des propositions à partir d'axiomes. Cet engendrement correspond à un type de raisonnement : la déduction. Les axiomes sont eux-mêmes des propositions bien formées à partir d'un ensemble de symboles, en respectant les règles de syntaxe.

Le langage formel, selon les philosophes Etienne Balibar et Pierre Macherey, est constitué d'« un ensemble fini ou dénombrable de symboles, repartis selon usage en constantes, variables, symboles logiques, symboles de relations, symboles impropres », comme la ponctuation. Les symboles étant donnés, un « sous-ensemble d'expressions du système » est créé. Il est appelé sous-ensemble des « formules du système ». Ces formules ont un caractère intelligible représentant « soit l'énoncé d'une relation, soit celui d'une proposition » qui prend une « valeur de vérité », dans une interprétation du langage, c'est-à-dire, dans un ensemble d'objets où les formules sont susceptibles d'être reconnues comme vraies ou fausses. (Balibar, Macherey 2017).

Les axiomes sont des formules particulières du langage qui sont interprétées comme vraies. La constitution d'un tel langage formel est la formalisation, qui peut servir à la « présentation des théories scientifiques (...) des mathématiques dans le cadre d'un système formel (...) ».³ L'intérêt de la formalisation des théories mathématiques réside dans le fait de créer des concepts et des problèmes internes à celles-ci dans un cadre parfaitement rigoureux. L'unité de la formalisation des mathématiques est liée « au développement de l'axiomatique et à l'étude des espèces de structures abstraites (selon la terminologie de Bourbaki) ». Cette pratique spéculative se constitue à partir du XIX^{ème} siècle. Selon Etienne Balibar et Pierre Macherey, le concept de nombre était à cette époque conçu ni comme une « représentation concrète », ni comme une « évidence intellectuelle », mais plutôt comme un « symbolisme », correspondant

à un système de nombres obéissant aux « règles opératoires de commutativité, associativité et distributivité ». (Balibar, Macherey 2017)

En sciences formelles, la méthode de justification, repose sur la démonstration. Démontrer une proposition consiste à engendrer successivement des propositions à partir des axiomes en respectant les règles de déduction que l'on s'est donné et « le critère ultime de validation est la non-contradiction ». La notion de démonstration exprime de manière formelle ce que l'on appelle une déduction... La déduction, permet d'exprimer « les diverses relations qui peuvent exister entre propositions », et la vérification repose sur une notion de vérité, « relative à une interprétation sémantique. » (Ladrière 2017). Cette interprétation est la correspondance entre des expressions du langage et « un certain domaine d'entités » (Ladrière 2017), dont on parle et que l'on connaît intuitivement.⁴ Ce domaine dans lequel les axiomes s'interprètent comme vrais est ce que l'on appelle un « modèle » du langage formel. Cette notion de modèle ne devant pas être confondue directement avec ce que les scientifiques de la nature et les ingénieurs appellent « modèle » empirique. Le système de validation par démonstration établi par un système d'énoncés contrôlés par le principe de non-contradiction pose deux problèmes principaux exposés par Jean Ladrière. La « logique de la déduction naturelle » traite de l'un et la logique combinatoire du second. (Ladrière 2017). D'une part, la déduction consiste en une « suite finie de formules dont chacune est soit un axiome, soit une conséquence immédiate des formules précédentes en vertu d'une règle d'inférence » (Balibar, Macherey 2017).

La logique de la déduction naturelle tente d'élucider ce premier problème, celui de la dérivation, et propose des théories des relations inférentielles. D'autre part, la logique combinatoire étudie le second problème, qui réside dans les mécanismes de nature logique et « qui donnent lieu aux contradictions » possibles. (Ladrière 2017). Nous observons donc une diversité de branches, aussi, au sein même de la logique. Par exemple, la logique formelle permet d'analyser la validité des hypothèses, notamment celle des inférences dans les expériences de pensée. Ce domaine comporte « la théorie des fonctions de vérité et la logique des prédicats, ainsi que des éléments de logique non classique. », comme l'explique le philosophe Gilbert Hottois dans

⁴ La connaissance intuitive est une connaissance directe par expérience et non pas basée sur des définitions formelles. Par exemple, vous avez une connaissance intuitive des nombres, de l'espace, avant toute théorisation. Par exemple, on écrit les axiomes de l'arithmétique d'une part, c'est abstrait, mais vous vous connaissez depuis longtemps ce que sont les nombres (de manière intuitive : on vous a montré des pommes et comment faire des additions en pensant aux pommes que vous connaissez par expérience intuitive, sans avoir fait des mathématiques évoluées et avoir donné des définitions formelles profondes).

Penser la logique (Hottois 2002). Une autre forme de logique, la logique bayésienne, repose sur le critère du plus probable.

Au fil de l'histoire des logiques variées sont apparues : logique, intuitionniste, logique paraconsistante, logique linéaire... Face à cette diversité de logiques, postulons que l'unité de la logique repose sur le raisonnement défini rigoureusement au sein d'un langage formel. Ensuite, nous comprendrons, en suivant le raisonnement de Daniel Andler (2018), la distinction entre logique et raisonnement.

Le raisonnement est une combinatoire entre propositions, un « mécanisme d'élaboration d'inférences ». L'inférence est l'« opération de l'esprit qui passe de propositions assertives, comme prémisses, à des propositions assertives, comme conclusions » (Armengaux s.d). Le raisonnement est aussi l'un des sujets d'étude de la psychologie cognitive en interaction avec d'autres disciplines, comme le rappelle Jean Baratgin : « philosophie, logique, théorie des probabilités, économie » (Politzer et Baratgin, 2016). Elle étudie l'argumentation, qui consiste à faire passer d'une représentation à l'autre. En premier lieu, elle distingue les arguments démonstratifs et non démonstratifs. Concernant les arguments démonstratifs, ou déductifs, la conclusion est vraie si les prémisses sont vraies, puisqu'elle en est déduite, et que l'on considère le langage formel comme correct, c'est-à-dire : tout ce qui est démontrable à partir des axiomes est interprété comme vrai. D'un point de vue discursif, la prémisse peut être introduite par « si », condition initiale, « et », pour l'addition d'une autre prémisse et la conclusion qui en résulte par « donc ». On peut énoncer, par exemple, que si les hommes sont mortels, et si Socrate est un homme, Socrate est donc mortel. Ce raisonnement passe d'une affirmation générale, pouvant être admise (axiome), les hommes sont mortels, à l'application de cet exemple à un particulier par le fait qu'il possède cette condition. Du fait qu'il possède cette condition humaine, il est possible de déduire qu'il possède cette même condition de mortel. Concernant les arguments non démonstratifs, ou probabilistes, la conclusion réside dans le fait que cela est « plausible » et cette probabilité est quantifiable. Ce raisonnement nécessite de trouver « des hypothèses explicatives » et l'abduction consiste à écarter ce qui semble improbable. Le raisonnement procède donc soit par démonstration, soit par quantification des probabilités. Selon le cas, nous fondons le raisonnement soit sur ce qui est acceptable comme vrai et sans nécessité d'être démontré, l'axiome, soit sur la détermination du probable. (T. Collins, D. Andler et C. Tallon-Baudry 2018).

En fait, plusieurs logiques sont possibles reflétant les diverses manières de raisonner. Elles diffèrent par le type d'opérateurs ou connecteurs, par le nombre de valeur de vérité, par le type

de règles de déduction comme nous l'avons dit et surtout par les axiomes. La logique des prédicats, par exemple, enrichit la logique des propositions de la notion d'attribut, propriété d'un individu ($S(x)$: x est par exemple Socrate). La logique modale introduit des opérateurs de nécessité et de possibilité. La logique probabilitaire considère des valeurs de vérité comme étant tous les réels entre 0 et 1... Cependant, une distinction entre logique et raisonnement existe et se manifeste dans l'intelligence artificielle, qui procède de manière logique et calculatoire, mais sans épuiser ce que l'on entend par raisonnement. Ainsi, comme l'écrit Daniel Andler, mathématicien et philosophe, « si la logique semble commander, en fait ou en droit, le raisonnement, il se pourrait donc qu'il n'en soit rien (ni en fait ni en droit) » (Andler 1995).

Dans l'article *Logique, raisonnement et psychologie*, Andler commence par traiter du raisonnement déductif en décrivant les trois théories du premier ordre associées : la logique mentale, les schémas pragmatiques et les modèles mentaux. La théorie de logique mentale remonte généralement à Piaget ou Boole. Aujourd'hui, cette théorie tente d'articuler logique et psychologie. La théorie des schémas pragmatiques se fonde sur l'idée de la répétition de schémas. Elle insiste sur le conditionnement. La théorie des modèles mentaux est davantage constructiviste. L'idée repose sur le fait qu'il y aurait comme une mise à jour de la représentation en fonction d'un élément antérieur. Andler conclut sur trois points, en premier lieu, sur le lien entre logique et raisonnement, puis sur les bases cognitives du raisonnement et sur le système « logique, langage, pensée ». (Andler 1995) Le lien entre logique et raisonnement est indéniable car l'absence de logique conduit à la perte du sens du raisonnement. Cependant, s'il y a une logique à tous les raisonnements, la finalité des raisonnements n'est pas forcément logique. Autrement dit, on ne raisonne pas pour être logique, mais il faut être logique pour raisonner. Le raisonnement dépend donc de la logique et la logique dépend de la manière de se représenter le raisonnement. Toutefois, la nature du raisonnement est à préciser. Le raisonnement peut consister à résoudre un calcul, sans comprendre à quoi correspond ce calcul. C'est ce que font très bien les ordinateurs. La question se pose de savoir qui raisonne, puis à quoi conduit le raisonnement. Nous nous détachons donc à présent du raisonnement d'Andler pour nous interroger sur ce que signifie comprendre.

L'idée d'une compréhension de tout, d'un « tout rationnel » ou « tout cognitif », émerge historiquement avec l'inclusion de la cybernétique aux sciences cognitives. En effet, l'historien et philosophe des sciences Jérôme Segal explique dans *Le zéro et le un* que « la cybernétique contient explicitement un projet unificateur fondé sur l'utilisation commune des notions de rétrocontrôle et d'information ». Puis, il rapporte l'émergence de cette discipline au contexte historique qui l'a précédé en mentionnant l'ambition du Cercle de Vienne de parvenir à « une

connaissance totale ». Par ailleurs, l’auteur renvoie plusieurs fois au long de son ouvrage à la « dimension unificatrice du projet de Wiener », mathématicien et père de la cybernétique. (Segal 2011). Mais l’information prend une pluralité de significations en fonction des disciplines qui pose des questions sur le type d’unification que l’information peut induire. Segal mentionne trois types d’unification énoncés par Hacking. La première unifierait philosophie et science autour d’un « sentiment métaphysique selon lequel « il existe un monde scientifique, une réalité et une vérité » puisque, pour Wiener, en rupture avec Carnap ou Neurath, la métaphysique est « la matrice de la pensée scientifique ». Le second type d’unification est pratique et se manifesterait par l’articulation entre les disciplines. Le troisième type d’unification est méthodologique. (Segal 2011).

Toutefois, ces perceptives d’unification montrent davantage les types de ruptures. D’une part, la distinction entre la science, qui construit des connaissances et s’intéresse au comment (manière), et la philosophie, qui analyse des concepts et s’intéresse au pourquoi (finalité). D’autre part, la diversité des disciplines scientifiques selon leur objet, leur nomenclature et leur mode d’expérimentation. Enfin, la diversité de méthodes relative aux modes de justification soit en fonction d’une démonstration mathématique abstraite, soit en fonction de l’efficacité d’une théorie scientifique formalisée et justifiée aussi par l’expérimentation. En outre, le système abstrait, peut être soit mathématique, et donc formel, soit philosophique. Aussi, Jean Ladrière s’interroge sur la distinction entre ces deux formes de systèmes, puisque ce dernier est également constitué de propositions, fonctionne sur la déduction et se vérifie par la logique. Selon lui, en philosophie, c’est le lien entre concepts qui est « beaucoup plus que le lien entre propositions (...) déterminant. ». (Ladrière) Pour comprendre cette affirmation, il faut clarifier la distinction entre concept et proposition. Le concept est « une représentation générale ou réfléchie de ce qui est commun à plusieurs objets. (...) produit de l’activité abstrayante de la pensée et outil logique du raisonnement. ». (Blay 2006). En logique, une proposition est une « assertion fondamentale jugée trop élémentaire pour être qualifiée de théorème⁵. Sa caractéristique est d’être susceptible de recevoir une valeur de vérité. » Le lien entre concepts est donc plus généralisant qu’un lien entre propositions. Enfin, un système philosophique « doit (en principe) ne contenir aucune contradiction et être assez riche pour fournir une interprétation de tous les aspects de la réalité » (Ladrière). Par ailleurs, qu’il s’agisse d’un ensemble de propositions déterminant un système formel ou d’un ensemble de notions pour déterminer un concept, il s’agit d’interroger la signification de la capacité commune à recourir à ces ensembles : la compréhension. En effet, l’unification par l’articulation d’un ensemble de

⁵ Un THEOREME est une EBF (Expressions Bien Formées) dérivée à partir des AXIOMES en utilisant un nombre fini de fois les Règles d’Inférence.

symboles, quel que soit son langage et ses codes a pour finalité d'être comprise. Les équations conçues et écrites par des scientifiques ont pour vocation d'être lisibles, traduisibles et même utilisables. Maintenant, nous allons donc analyser comment apparait cette compréhension en nous référant à l'ouvrage *Qu'est-ce que comprendre ?* (Deniau 2008).

Comprendre exprime la capacité de savoir refaire, reproduire quelque chose ou encore d'expliquer comment cela fonctionne. La compréhension est classée dans les « concepts psychologiques ». Il s'agit d'une capacité qui fait passer de l'état d'ignorant à celui de savant à propos de quelque chose en fonction d'une explication. La compréhension peut être en relation avec un savoir-faire, un savoir être par le comportement, ou relative à la signification d'un symbole dans un langage. Comprendre permet d'agir de façon « appropriée aux circonstances » par le raisonnement ou l'habitude. La compréhension est donc le saisissement de quelque chose à faire ou d'une attitude à adopter. On peut comprendre aussi l'état émotionnel d'une personne en fonction des événements. La capacité de saisie de quelque chose est une expérience intérieure qui manifeste une appropriation relative à une manifestation extérieure. Dans un langage, l'explication permet de comprendre une attitude qui peut même se révéler incohérente. Comprendre c'est « assembler », « ramasser » rendre cohérent. Il s'agit de « faire des connexions ». Par exemple, on possède une certaine représentation de l'humain. On comprend qu'on ne pourra pas attendre les mêmes choses d'un humain, d'une poule ou d'une pierre, car les capacités sont différentes.

En outre, le philosophe Guy Deniau explique que comprendre permet « entre les parties d'un tout de rassembler un multiple sous une certaine unité » (Deniau 2008) (c'est d'ailleurs le sens latin du mot comprendre cum (avec) et prehendere (saisir)) et « le rapport entre le tout et les parties détermine le sens ou la signification » (Deniau 2008). Le choix du rapport est l'élément explicatif de l'ensemble. Par exemple, la raison qui réunit plusieurs personnes en un groupe est l'explication de l'existence de ce groupe. Cependant, il s'agit de distinguer le but, qui « suppose la volonté qui le pose », du sens « qui est avant tout une structuration interne entre des parties ». (Deniau 2008). Les buts peuvent être différents en fonction de la motivation des membres du groupe. Par contre, pour être un groupe, ayant une finalité, il est nécessaire qu'il y ait une organisation entre les membres, ne serait-ce que pour parvenir à se rencontrer. Il faut un moyen de lier la pluralité qui compose ce tout. Le sens est donc relatif au type d'organisation dans un groupe ou un ensemble. Il est signifié par l'articulation entre des parties afin que ces parties coïncident en un tout. Le sens se rapporte au lien à une structure commune. Par exemple, tous les doctorants sont inscrits dans une université. Ainsi, la compréhension peut être soit en fonction d'un discours, soit en fonction d'une « situation » (Deniau 2008).

Dans le cas du discours, il est nécessaire de partager un langage et des acquis conceptuels communs. Par exemple, si je dis à un enfant que je suis doctorante. Je vais devoir lui expliquer en simplifiant beaucoup de concepts complexes. Dans le cas d'une situation, la compréhension est relative à un ensemble de croyances et de postulats pouvant être vrai ou faux et à éclaircir. Par ailleurs, on peut croire comprendre et ne pas comprendre. Par exemple, une personne en voit une autre ramasser un animal écrasé sur la route. L'observateur croit alors comprendre la situation en se disant que la personne qui le ramasse est celle qui l'a écrasée. Mais, en réalité, la personne qui ôte l'animal de la route n'est pas forcément celle qui l'a tué. Il y a alors une confusion dans l'association des faits. Par cet exemple, il est possible d'en venir à la perception, qui est une forme de compréhension, car elle associe un ensemble de stimuli extérieurs saisis en fonction de l'appareil sensoriel et interprété en fonction des représentations mentales mémorisées et d'un contexte.

Ensuite, il s'agit de distinguer l'interprétation de la compréhension. Par exemple, si j'entends un bruit, je peux l'associer à l'arrivée d'invités. Cependant, il s'agit déjà davantage d'une interprétation que d'une compréhension d'un fait car la compréhension n'ajoute rien : « comprendre la règle c'est l'appliquer et l'application exclut toute interprétation. ». Ainsi, dans le cadre de cet exemple, la compréhension sera uniquement la constatation qu'il y a un bruit, sans chercher à expliquer la cause de ce bruit. Pour décrire ce bruit, je peux dire que cela ressemble à un bruit de pas. Or, ce sera l'association des bruits de pas au fait que j'attende des invités qui me fera conclure que ce bruit est produit par l'arrivée des invités. Ainsi, « pour garantir la justesse de l'interprétation, il faut produire un nouvel énoncé qui confirmera l'interprétation proposée, à l'infini. » Au contraire de l'interprétation, la compréhension est « une circonscription », sans extrapolation. La compréhension sans interprétation est donc une description des faits, alors que l'interprétation est une explication des faits en fonction d'un lien de causalité. Finalement, comprendre revient à identifier « des connexions, saisir des rapports » (Deniau 2008).

Pour terminer, il s'agit de préciser les types de connexion et de rapport. Il s'agit de signifier leur essence. L'essence est la « propriété commune appartenant à diverses choses, qui justifie que l'on caractérise ces choses par un concept qui leur est commun. » (Deniau 2008). Par exemple, il est possible de signifier à la fois le concept de matière, auquel un ensemble de phénomènes observables se rapporte, et celui de vivant, auquel un autre ensemble de phénomènes observable se rapporte, car il est possible de décrire la différence entre la matière inerte, inorganique, et le vivant, organique, par les facultés que possède le second. La

compréhension sous-tend donc l'attention portée sur un objet afin d'avoir une idée claire de ce qu'il est et de son fonctionnement par l'accumulation d'un ensemble de connaissances. Mais les connaissances peuvent elles-mêmes être soit formelles, soit empiriques. La distinction réside dans le fait que l'une repose sur la cohérence d'un ensemble de propositions en logique ou mathématiques, ou un ensemble de notions en philosophie autour d'un concept, ou en fonction d'un principe, d'une idée, alors que l'autre type de connaissances repose sur un ensemble de phénomènes observables. Fondamentalement, les mathématiques reposent sur l'idée de relation. Cependant, d'autres types de relations, non-mathématiques, existent. Dans les sciences empiriques, en physique par exemple, les relations correspondent aux grandeurs observables et quantifiables.

2. L'idée d'un tout mathématique.

Selon le cosmologiste Max Tegmark⁶, il y a « une seule véritable réalité » et des « façons complémentaires de la percevoir », comme il n'y a qu'un diamant qui contient une multitude de facettes. Dès lors, la question de la nature de cette réalité, qui échappe aux sens et qui n'en perçoivent que des fragments, se pose. La position de Tegmark et de bien d'autres (les pythagoriciens, par exemple) est que la nature de la réalité est mathématique. Cependant, tout réduire aux mathématiques procède d'un choix philosophique très particulier, qui emploie un mode de description unique pour signifier l'ensemble de ce qui est dans le monde. Nous allons entrer dans cette philosophie pour comprendre jusqu'où conduit cette description computationnelle de l'univers faite par le scientifique dans son ouvrage de vulgarisation *Notre univers mathématique* (Tegmark 2014). Pour cela, nous allons au préalable, nous interroger sur la manière de représenter mathématiquement une totalisation.

Tout d'abord, notons que la totalisation se construit par une équivalence : « deux descriptions sont équivalentes s'il existe une correspondance entre elles préservant toutes les relations » (Tegmark 2014). Ainsi, par l'ajout d'une catégorie plus globale définie par une équivalence, on en vient à une équivalence mathématique permettant, en effet, de considérer, en adoptant un certain point de vue, deux objets différents comme un et seul et même objet, à pouvoir « additionner des pommes et des poires », par exemple, dans la catégorie fruit, alors qu'elles sont différentes par leur goût et leur forme. C'est aussi par là qu'on en vient à trouver une

⁶ Nous renvoyons ici à la profonde analyse de JP. Delahaye, *Tout. Les rêves mathématiques d'une théorie ultime*. Paris, Hermann, 2011, dont le chapitre 7 (pp.241-267) est consacré à la position de Tegmark et à la réponse qu'il apporte à la question de la raison de l'efficacité des mathématiques.

équivalence entre la lumière et la matière, qui se comporte aussi de manières différentes. Les mathématiques vont donc unifier des choses différentes par une correspondance.

La structure mathématique révèle cette forme de correspondance : un « ensemble d'entités abstraites munies de relations entre elles ». La nature de la liaison est donc par définition abstraite. Ainsi, les relations entre entités n'ont aucune propriété physique, seulement une « information sur les éléments qu'elles relient ». Les informations sont « les bagages » relatifs à un langage, « concepts et mots inventés par les êtres humains par commodité », mais qui, pour Tegmark « ne sont pas nécessaires pour décrire la réalité physique externe ». (Tegmark 2014). Puis, les relations entre ces bagages sont quantifiées par des structures mathématiques, selon un type de nombres (naturels, entiers, complexes, etc.). Ensuite, d'une manière plus globale, elles sont associées à une correspondance en un ensemble plus large autour d'une équivalence, ou catégorie, permettant de constituer des groupes.

Enfin, une invariance est recherchée, par symétrie, « propriété de rester inchangé suite à une transformation ». Il se dessine alors une réalité extérieure dans le sens, où elle est si abstraite qu'elle est loin de la perception concrète du réel. L'extériorité est donc donnée par un haut degré d'éloignement du concret apparent dans une représentation globalisante. Cependant, il reste le point de fuite, ou le fil d'Ariane, construisant le chemin bijectif entre le réel perçu et la réalité globale du concret à l'abstrait et de l'abstrait au concret. C'est un problème récurrent de la philosophie de la connaissance que l'on trouve, par exemple, chez Wittgenstein, avec l'impossibilité de se représenter le lien qui unit le monde et sa représentation dans un « tableau » logique.⁷

Par ailleurs, penser que l'univers est calculable suppose que « la réalité physique externe est une structure mathématique finie » bien déterminée (Tegmark 2014). Cette description mathématique de la réalité repose notamment sur la théorie des graphes qui associe mathématique et informatique et qui permet de représenter de manière imagée des connections. Ainsi, la réalité est comprise comme une « réalité relationnelle » (Tegmark 2014). Ce mode de description évite donc les pièges de l'infini hiérarchique du plus grand ou du plus petit et la simplification du réductionnisme : « les propriétés de la nature n'émergent pas des propriétés de ses ultimes constituants élémentaires (lesquels en sont dénués), mais des relations qu'il y a entre ces derniers » (Tegmark 2014). Il s'agit donc d'une explication de la complexité, notamment à l'aide de la théorie des motifs simples, pour l'inanimé, et plus « sophistiqué »

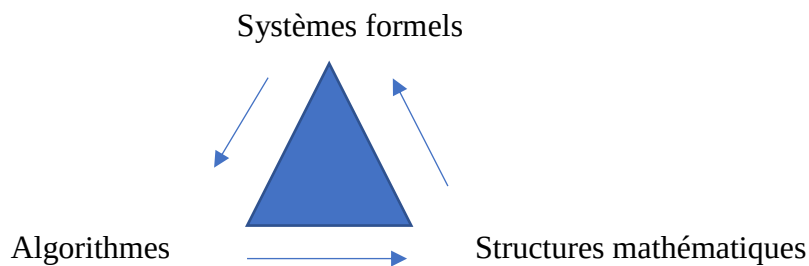
⁷ Cf. *Tractatus Logico-Philosophicus* (trad p. Klossowski; intro B.Russell, notes A.Patri), Paris, Gallimard, 1961, 2.1, 2.11 et suivants, pp.50-55.

pour le vivant, dont l'enchevêtrement cesse à la mort : « lorsqu'un organisme vivant meurt, il se désintègre finalement et ses particules se séparent les unes des autres » (Tegmark 2014). La distinction entre inerte et vivant est donc ici relative au degré de complexité des relations par motif simple ou élaboré.

De plus, la description mathématique de la réalité physique, la réalité considérée comme ultime par Tegmark, est nommée « HUM », « Hypothèse de l'univers mathématique ». Cette représentation suppose de penser que le temps, le changement, la création et la destruction sont des illusions. Pour le cosmologiste, ce qui subsiste n'est que la structure mathématique de l'espace-temps et, ce qui la constitue, « cette matière semble être associée à des champs : des nombres déterminant ce qui se trouve en chaque point de l'espace-temps » et la « sous-structure autoconsciente » que nous sommes, est enchevêtrée dans l'espace-temps par des motifs « tressés qui correspondent au traitement de l'information et à la conscience de soi », en mécanique quantique, ce motif « se ramifie comme un arbre » (Tegmark 2014). Par ailleurs, dans cette description, qui associe informatique et mathématique, on peut se demander quelle est la place de nos images mentales. Tegmark répond : « les images de la réalité subjective que vous percevez en ce moment n'existent que dans votre cerveau, elles font partie de votre modèle cognitif de la réalité (...) ». La conscience de soi et des choses est alors relative au modèle cognitif construit en rapport avec les « relations extérieures » à soi. « Je » est l'ensemble des « perceptions d'un point de vue particulier », les « qualias »⁸.

Du reste, Tegmark affirme la teneur philosophique, et non scientifique, de ce postulat, puisqu'il est non réfutable, ni prédictible. (Tegmark 2014). La totalisation en un tout mathématique, dont nous parlions plus haut, relève donc ici d'un principe (point de départ) qui est assurément philosophique. Cependant, ce choix philosophique de principe est argumenté. Nous pouvons penser que l'HUM fait le choix d'une sorte de « transcendance ». Il s'agit d'une philosophie idéaliste assumée qui unifie en un modèle conceptuel tripartites les mathématiques : les systèmes formels, les algorithmes et les structures mathématiques.

⁸ Dans une interprétation de la mécanique quantique, celle dite des « monde multiples », chaque mesure correspond à un point de bifurcation d'un graphe, dont les branches issues de cette bifurcation représentent des univers où s'actualisent les divers résultats possibles de la mesure.



(Simplification du schéma)

La triangulation entre ces trois points donne cette description : les systèmes formels décrivent les algorithmes, qui sont des cas particuliers de structures mathématiques, qui elles-mêmes sont des modèles de systèmes formels et les systèmes formels décrivent les structures mathématiques, qui sont définies par des algorithmes, qui décrivent les systèmes formels (Tegmark 2014). Il y a donc un lien conceptuel, logique, entre les idées de formes et de structures par les modes de calcul car l’algorithme décrit un calcul.

L’unité de ce tout formellement constitué repose sur la notion informatique de bit, qui est aussi un concept de la théorie de l’information, qui permet de relier le monde physique et un modèle cognitif. De plus, la notion d’information est présente dans toutes les disciplines scientifiques qu’on parle d’information génétique en biologie ou d’information quantique en physique. L’information est aussi l’élément essentiel qui circule dans le langage naturel. En ce sens, l’information est donc une notion interdisciplinaire même si, comme pour l’énergie, sa signification est différente selon les disciplines. D’un point de vue physique, l’information décrite par Shannon, ou plus précisément la capacité de transmission d’information, est spécifiée par « le nombre de bits par seconde pour caractériser le signal » (Shannon 2018). Le bit permet de caractériser l’information d’un signal digital. Mais, la nature du signal peut aussi être analogique, « si sa mesure donne un nombre réel variant de façon continue. »⁹ La variable, décrivant le signal, est donc soit continue, soit discontinue (nombre entier).

⁹ Définitions "Signal analogique / numérique", sur *Académie de Grenoble*, (en ligne : <http://www.ac-grenoble.fr/college/jean-monnet.st-jorioz/techno/clg/old-html/Documents/definition-analogique-numerique.htm>)

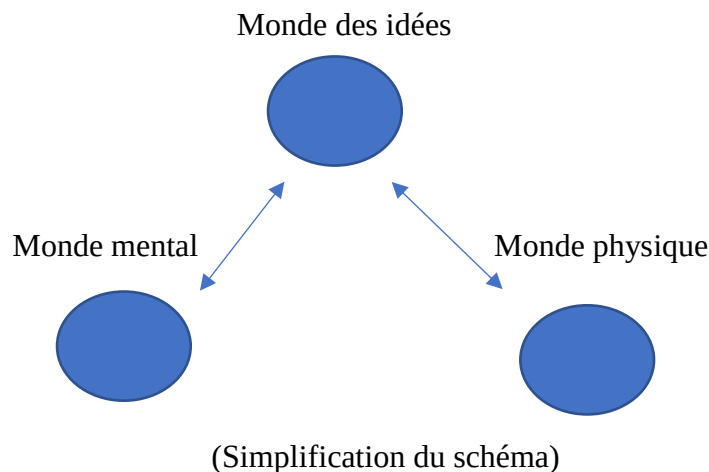
Dans la pensée de Tegmark, l'information, quantifiée par le nombre de bits, est reliée à la « théorie des motifs ». La théorie des motifs appartient à la géométrie algébrique et tente d'unifier plusieurs branches des mathématiques. Elle débute avec les travaux de Grothendieck et a des applications dans la théorie des nombres transcendants. Tegmark considère l'information à travers les bits nécessaires pour décrire un motif. Il met aussi en rapport les nombres complexes et les formes des fractales : « malgré son apparence complexe de millions de pixels (...) la fractale de Mandelbrot (...) possède une description très simple : les points de l'image correspondant à ce que les mathématiciens appellent des nombres complexes ». L'érudition du mathématicien le fait passer d'un domaine à l'autre, avec aisance, puisqu'il en vient ensuite à la cosmologie. Selon lui, l'inflation engendre « tous les motifs possibles dans des régions distinctes de l'espace ». Dès lors, si « le quantum et les symétries de la Nature (...) ont été mariés (...) par un demi-siècle d'étude » (Tegmark 2014), assisterons-nous prochainement à un nouveau mariage entre les catégories de nombres ?

La théorie des nombres se charge de cela et sa place n'est pas des moindres comme le rappelle le mathématicien Jürgen Neukirch dans *Cohomology of Number Fields* : « La théorie des nombres occupe parmi les disciplines mathématiques une position idéalisée analogue à celle qu'occupent les mathématiques elles-mêmes parmi les autres sciences » (Neukirch, Schmidt, Wingberg 2008). Mais, les différentes unifications se révèlent être une multitude de noces entre les théories, entre mécanique et chimie par la thermodynamique à celle espérée entre physique et cosmologie pour décrire une forme d'univers. Dans ce sens, le physicien Gabriel Chardin écrit que « ce sont plutôt les nombres entiers, des objets à valeurs discrètes, comme des bits de données ou leur version quantique, les qbits d'un ordinateur quantique, qui sont le bon objet pour représenter l'univers, plutôt que les nombres réels d'un espace-temps continu à quatre dimensions (...) » (Chardin 2018).

Enfin, l'« Hypothèse de l'Univers Fini » (HUF) proposant que notre réalité physique externe est une structure mathématique finie implique l'HUC (Hypothèse de l'univers calculable) et élimine tous « les problèmes liés à une réalité non-définie. » (Tegmark 2014). En somme, l'univers serait pour Tegmark, mathématique, fini et calculable. Ainsi, à chaque échelle, des propriétés mathématiques sont observables : des hypothétiques supercordes, à la modélisation des particules, du noyau atomique, des molécules, des neurones, des individus, aux planètes, galaxies, à l'univers et à ses possibles métamorphoses, ou bulles comme le représente une image en fin d'ouvrage de Tegmark avant de poursuivre sur le sens de la vie.

A travers ces lignes, nous n'avons qu'esquissé la pensée originale et contemporaine du mathématicien Tegmark, persuadé que la nature de la réalité est relationnelle et l'univers mathématique. Les détails ne nous importent pas ici car le point essentiel est de savoir sur quoi repose son hypothèse de base. Comment Tegmark peut-il assurer que l'univers est fini et de plus calculable ? Existe-t-il chez lui un argument qui permettrait d'établir cela ? Comme nous l'avons dit, identifier l'univers aux structures mathématiques revient à identifier l'univers à sa représentation et cela est une hypothèse très forte du point de vue philosophique, qui mériterait des fondements critiques que l'on ne trouve pas assez chez Tegmark. De plus, ce point de vue n'est pas le seul.

Pour Penrose, la nature de la réalité est plus complexe à qualifier : « je ne pense pas que nous ayons véritablement trouvé la « voie de la réalité ». Dans le dernier chapitre de son ouvrage sur la « découverte des lois de l'univers », il retrace « notre long chemin mathématique vers la réalité », sans penser que nous sommes arrivés en bout de course : « nous sommes encore bien loin d'une théorie finale » (Penrose 2015). Comme nous essayons de le souligner dans cette thèse, Penrose montre dans son ouvrage que la physique fondamentale est « mue par les mathématiques » (Penrose 2015). Par ailleurs, à l'instar de Tegmark, Penrose réalise en conclusion une figure et des relations exprimées par l'image d'un triangle. Mais, au sommet se trouve une sphère avec les mots « moralité », « beauté » et « vérité ». La réalité n'est donc pas réduite aux propriétés mathématiques. Ce monde fait inévitablement penser au monde platonicien des idées. D'une part, à l'angle gauche, le monde mental est représenté par une sphère. D'autre part, à l'angle droit le monde physique par une autre sphère. Cette représentation illustre pour Penrose « trois mondes et trois mystères ornés des absolus platoniciens ». (Penrose 2015). Puis, il précise que la beauté et la vérité sont intriquées dans la théorie physique, alors que la moralité appartient entièrement au monde mental. Ensuite, il poursuit sur la place du monde mental dans les théories physiques.



Enfin, Penrose se dit opposé au point de vue conventionnel selon lequel la conscience n'émergerait que « d'activités computationnelles (dont la nature demeure inexpliquée) ». (Penrose 2007). Ses arguments reposent en partie sur le théorème de Gödel et sur la notion de calculabilité selon Turing. Au contraire, il propose que l'explication vienne plutôt d'une théorie manquante, et non computationnelle. Puis, il termine sur « les succès des mathématiques pures » par la théorie des infinis de Cantor, du théorème d'incomplétude de Gödel et de la théorie des catégories, en s'interrogeant sur le fait qu'elles puissent être associées à la « physique du XXIème siècle » et sur l'ouverture « à des idées fondamentalement nouvelles » (Penrose 2015).

Penrose invoquait déjà, dans son ouvrage *Les deux infinis*, le théorème de Gödel à propos de l'hypothèse computationnelle de la conscience, en rappelant que « quelque chose peut être mesuré de l'extérieur (...) La clé de l'argument (...) est que c'est l'aptitude générale à comprendre qui a été sélectionnée par l'évolution - laquelle peut incidemment être également appliquée à la compréhension des mathématiques ». (Penrose 1999). Ainsi, il ne s'agit pas que de calculer, il s'agit aussi de construire ces opérations en imaginant des types de combinatoires, de produire des résultats et surtout de les comprendre. En ce sens, les mathématiques ne peuvent se défaire de la logique qui démontre. Alors, face à la philosophie du tout mathématique, et plus précisément du « tout numérique », calculable, ou computationnel, nous évoquerons l'idée d'un « tout physique » à travers la notion de loi et de théorie ultime. Toutefois, il s'agit avant de signifier la méthode d'acquisition et de justification des connaissances dans les sciences empirico-formelles.

Pour conclure, il s'agit déjà de préciser qu'on peut spéculer sur la nature de la réalité et les philosophes des sciences, ou non, s'adonnent à ces spéculations. Mais, concrètement, on peut distinguer justement ce qui est de l'ordre de la spéculation et du réel. Les mathématiques sont la science des relations. Elles sont donc les outils adaptés pour une description d'une variété de combinaisons, puisqu'elles établissent des connexions exprimées dans un langage. De plus, le tout computationnel est figuratif. Le problème capital que pose les pensées de Tegmark et de Penrose n'est pas leur cohérence et leur fécondité conceptuelle qui sont manifestes, mais bien plutôt l'absence de justification critique de leur point de départ. Chez Tegmark, on n'a pas d'argument justifiant l'identification de l'univers (comme totalité des phénomènes) avec une réalité purement mathématique (et de plus fini, calculable.) Chez Penrose, on n'a pas d'argument pour vraiment fonder rationnellement l'existence et l'indépendance relative des trois mondes : le monde des idées (dont mathématiques), le monde physique, le monde mental. A défaut d'argument, l'intérêt de ces positions non-critiques qui permettent d'organiser une vision du, ou des « mondes », de la nature et de l'esprit est de mettre en évidence la nécessité d'une pluralité de champs de réalité, en relation, mais irréductibles les uns aux autres. C'est ce point qui est important pour notre thèse. Pour unifier le « tout », Penrose comme Tegmark doivent poser, à la manière d'une hypothèse philosophique forte, une pluralité ontologique.

3. L'unification par l'axiomatique en mathématiques et le formalisme en physique.

A présent, nous allons analyser les méthodes d'unification scientifique en mathématiques par l'axiomatique et, en physique, par le formalisme, leurs liens et divergences. La scientificité d'un système formel est justifiée par la méthode axiomatique qui relève du champ des mathématiques. Cependant, l'axiomatique est aussi appliquée en physique à travers différents types de formalismes. Nous allons décrire dans ce paragraphe comment s'est formée cette méthode, les premières formes d'axiomatiques, puis l'établissement de la correspondance entre axiomatique et formalisme grâce à un article du mathématicien Georges Glaeser. Enfin, nous évoquerons le niveau de confiance de cette méthode en nous référant à un article de l'épistémologue Éric Audureau.

Tout d'abord, l'axiomatique fait référence aux axiomes ou postulats qui sont « toutes les propositions que l'on admet sans démonstration et qui ne sont pas des définitions », mais aussi aux « règles de déductions », aux axiomes logiques. Ensuite, une démonstration est réalisée à partir de ces données. Elle engendre les théorèmes de la théorie : « seules comptent les relations explicitement précisées par les axiomes entre les signes représentant ces objets, eux-mêmes explicitement précisés par des axiomes ». Le premier exemple d'axiomatique que l'on peut

citer se trouve dans les Éléments d'Euclide, ouvrage rédigé au III^{ème} siècle av. JC. Puis, le second exemple est au XIX^{ème} siècle, il s'agit de la théorie des ensembles de Cantor développée par Peano et Dedekind, qui forma une « axiomatique sur la théorie des nombres entiers ». Grâce à cela, l'arithmétique, et par là le phénomène de récurrence, furent axiomatisés. Un autre exemple est la géométrie élémentaire, axiomatisée par Hilbert au XIX^{ème} siècle à partir de cinq éléments : les axiomes d'incidence, de disposition, d'égalité, d'Euclide et de continuité. Ces exemples correspondent à des axiomatiques « fermées » (Glaeser s.d). Les axiomatiques « ouvertes », ouvrent, comme le nom l'indique, à d'autres domaines que celui qu'elles considèrent au départ. Elles voient le jour avec « la théorie axiomatique des espaces vectoriels ». (Glaeser s.d).

Par ailleurs, en 1888, Peano formule « les axiomes des espaces vectoriels » en vue d'appliquer la méthode axiomatique pour la description « des forces, des vitesses, etc. », « dans une théorie unificatrice ». Cette formulation permet son application à d'autres objets. Enfin, l'algèbre linéaire permet « d'engendrer de nouveaux objets mathématiques » (Glaeser s.d). L'axiomatisation devient donc un outil « génératif ». Elle ne se contente pas de décrire une situation mathématique fixe, mais elle est ce qui donne à penser pour créer de nouveaux concepts. Il est intéressant de souligner le lien entre axiomatisation et formalisation. Ainsi, la méthode axiomatique donne « un cadre adapté au traitement mathématique de nombreuses situations ». (Glaeser s.d). Le phénomène physique est « mis en équation ». Le problème est alors traité de manière déductive.

Pour Hilbert, « la méthode axiomatique permet de définir, ou d'introduire, les objets dont elle étudie les propriétés ». (Audureau 2011). Pour Frege « les objets existent préalablement à la description qu'en donne les théories axiomatiques et celles-ci doivent se conformer à cette existence » (Audureau 2011). Pour l'un, cette méthode permet de définir les objets qu'elle étudie, pour l'autre les objets existent antérieurement à la description permise par l'axiomatique. Certes, ils peuvent dans certains cas exister antérieurement puisqu'en effet, ce n'est pas cette méthode qui les fait exister. Toutefois, cette méthode permet de délimiter le champ descriptif, justement, par la détermination de propositions. Cette détermination permet, d'une part, d'être précis, exact, et d'autre part, de pouvoir construire une arborescence de déductions logiques. Ainsi, cette méthode est efficace dans l'articulation des savoirs mathématiques, puisqu'elle permet d'unifier, entre autres, « géométrie et arithmétique par la correspondance entre signe et représentation », comme le rappelle Éric Audureau. L'axiomatisation est donc un pas possible vers une unification de certains domaines des connaissances des mathématiques qui révèlent leur structure dans et par les axiomes. Le niveau

de confiance en cette méthode peut être lié au fait que, « ces signes ne sont pas choisis de manière arbitraire : ils doivent rappeler les phénomènes qui sont à l'origine de la prise en compte des nouvelles idées mathématiques. » (Audureau 2011). En effet, l'addition, par exemple, renvoie à une augmentation de quelque chose et la soustraction à une diminution de quelque chose. L'expérience du multiple traduit l'observation d'une pluralité par la similitude entre des choses, et la division émerge d'une réduction, d'une différence par comparaison et classification, ce qui correspond à des opérations cognitives élémentaires. En outre, la confiance en cette méthode est aussi déduite du raisonnement et provient de la cohérence interne du langage formel, puisqu'il est possible de remonter « la chaîne des déductions jusqu'aux axiomes de l'arithmétique ». (Audureau 2011).

Ensuite, vient la question de l'application de cette méthode mathématique à la physique. C'est d'ailleurs « le sixième problème » de Hilbert, qui souhaite donner une cohérence à la physique. Ce problème a été formulé en 1900. En 2022, il n'est pas encore résolu, puisque la physique se divise notamment en deux modèles : le modèle standard de la physique des particules et le modèle cosmologique soutenu par la relativité générale, une axiomatique commune n'ayant pas encore été trouvée qui les unifierait. Tout d'abord, cette application serait satisfaite si cinq conditions étaient respectées, comme il est rappelé dans la publication d'Audureau:

« 1) Dissocier les hypothèses, comme en Géométrie. 2) Constituer l'architectonique de la physique en construisant les théories particulières au moyen de l'adjonction de nouveaux axiomes. 3) Permettre au physicien d'avoir égard « non seulement aux théories qui se rapprochent de la réalité, mais encore en général à toutes celles qui sont logiquement possibles 4) Livrer des démonstrations de non-contradiction. (...) 5) Enfin, vérifier si des points de vue opposés au sujet des principes de la Mécanique, (...) le sont réellement ou si, une fois ces conceptions axiomatisées, et au terme d'une démonstration d'équivalence, ces oppositions se révèlent être simplement apparentes ». (Audureau 2011).

Mais, la méthode axiomatique, qui s'est déjà avérée efficace pour l'élaboration de théories particulières de la physique, ne s'est pas encore révélée efficace pour l'assemblage de plusieurs théories physiques en un seul cadre conceptuel unifié, même si le modèle standard de la physique parvient déjà à assembler plusieurs théories. L'axiomatique n'est donc utilisable par les sciences exactes que dans une certaine mesure. Si la méthode axiomatique permet de construire un cadre conceptuel, elle dépasse le champ de la pensée mathématique et donne un cadre solidement structuré aux sciences exactes, dont sont dépourvues les sciences humaines et sociales. Mais, absolutiser l'axiomatique conduirait à ne pas saisir l'apport de l'histoire de la

logique et les connaissances apportées par d'autres sciences, notamment les sciences humaines et sociales, utilisant d'autres méthodes, plus appropriées à leur objet, comme le choix d'un mode de justification relatif à un contexte.

Pour conclure, en décrivant la méthode axiomatique, nous avons montré le lien entre les mathématiques et la physique par la formalisation. Mais, tout projet d'axiomatisation, même réussie, repose sur des choix d'axiomes qui eux-mêmes ne peuvent trouver leur justification au sein des axiomes eux-mêmes, puisque les axiomes sont posés comme points de départ aux démonstrations. Or, on ne peut démontrer à partir des axiomes pourquoi on a choisi ces axiomes puisqu'il faudrait se baser sur les axiomes... Il s'agirait d'une pétition de principe. On démontre les axiomes en se fondant sur les axiomes. On peut dire évidemment que les axiomes sont leurs démonstrations mais cela n'avance à rien. L'unification par axiomatisation renvoie donc à un choix qu'il convient de justifier en quittant la clôture de l'axiomatique.

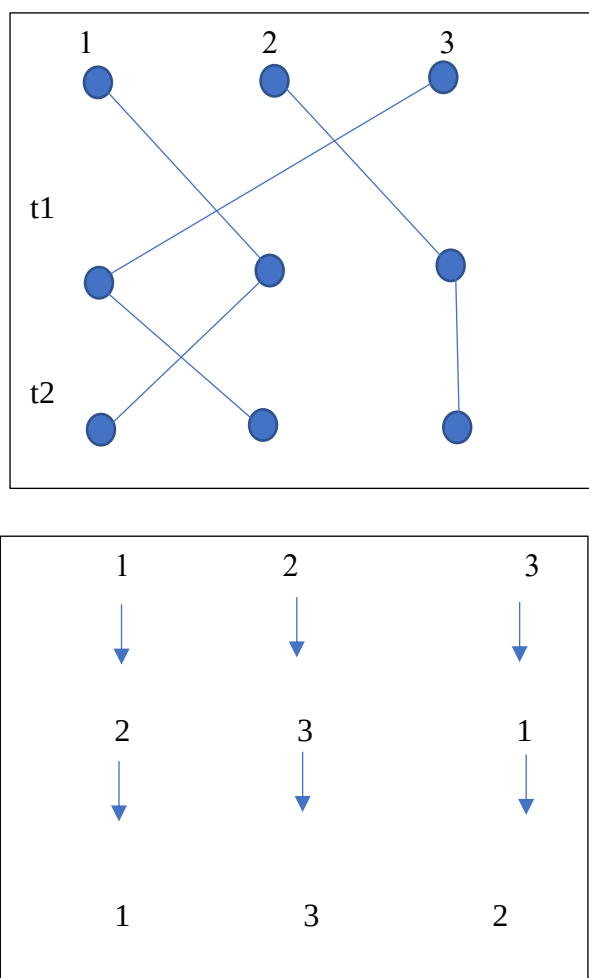
4. Les notions de continu et discontinu en mathématiques et en physique.

A présent, nous allons illustrer ce lien entre axiomatique et formalisme physique en considérant la description du continu et du discontinu en mathématiques, puis en physique, en suivant les explications du mathématicien Jean-Michel Salanskis, ainsi que les implications philosophiques qui en découlent.

Tout d'abord, il s'agit de distinguer la mathématique « non-fondationnelle » et « fondationnelle ». Pour la mathématique non-fondationnelle, pratique, « l'opposition du continu et du discret se retrouve, dans une certaine mesure, dans celle de l'analyse et de l'algèbre » (Salanskis s.d). D'une part, l'algèbre est associée à la théorie de la résolution des équations. Les solutions des équations algébriques apparaissent comme des « points » discrets qui révèlent des propriétés de symétrie exprimées par des groupes. Nous savons que « la structure de groupe, première grande structure axiomatique de la mathématique moderne, est sortie de la réflexion de Galois sur la théorie des équations » (Salanskis s.d). Si l'algèbre et sa méthode, l'équation, pointent en direction du discontinu, l'analyse, quant à elle, fut « d'abord l'étude des fonctions de la variable réelle, elle se situait donc tout entière et d'emblée dans le cadre du continu » (Salanskis s.d). Toutefois, cette distinction entre l'algèbre et l'analyse fut remise en question par « les mathématiques dites « bourbachiques », qui les firent se rejoindre dans un autre domaine : la topologie. L'algèbre est alors présentée en structures, « définies en termes de loi de composition et l'analyse à partir de « structures topologiques ». Dans « la plupart des secteurs de la recherche mathématique contemporaine, les points de vue algébriques

et topologiques se marient », puisque certaines constructions mathématiques permettent de passer d'un domaine à l'autre, notamment de la topologie algébrique à la géométrie algébrique. Un exemple de lien entre discontinu et continu est donné par le « groupe des tresses ». (Salanskis s.d)

Ce groupe, comme montre le dessin (ci-après), est lié à des permutations, donc à des opérations sur des ensembles discrets ici l'ensemble avec comme éléments 1,2,3. Mais il peut se représenter en termes de courbes déformables continûment.



La composition des tresses continues t2 et t1 correspond aux permutations discrètes des nombres 1, 2 et 3.

A propos de nouvelles **constructions mathématiques**, qui unifient des domaines très différents et leurs concepts, Claire Voisin explique, dans un article publié sur le site du Collège de France,

que la géométrie algébrique fut développée dans les années 1960 par Grothendieck.¹⁰ Il « a mis l'accent sur la théorie des schémas, dans laquelle la notion d'espace et de point dans un espace disparaît au profit de l'étude des anneaux de fonctions » (Voisin s.d). De plus, la mathématicienne précise que le lien « entre géométrie algébrique et géométrie analytique a été établi définitivement par Serres en 1955 dans un article magistral familièrement cité sous le nom de « principe GAGA » ». ¹¹ GAGA est l'acronyme du lien établi entre Géométrie Algébrique et Géométrie Analytique. Le point de vue algébrique et celui de l'analyse trouvent ici, au cœur de la géométrie, une unité étonnante.

La topologie algébrique et la géométrie algébrique portent sur des objets mathématiques différents. D'une part, la topologie algébrique porte sur des objets algébriques. Elle « repose sur l'idée d'associer des objets algébriques à tout espace topologique (groupes d'homotopie, d'homologie), d'étudier les répercussions au niveau de ces objets des qualités particulières du support topologique, et d'obtenir ainsi une technique nouvelle (« détournée ») pour démontrer des résultats topologiques », explique Claire Voisin. D'autre part, la géométrie algébrique porte sur l'étude des anneaux commutatifs. Elle « fabrique un objet « géométrique » (mais cet adjectif est ici synonyme de topologique) à partir de tout anneau commutatif (objet standard de l'algèbre commutative) ». Mais, « à travers des constructions complexes, on prétend cette fois démontrer des résultats algébriques au moyen du détour par un univers topologique sophistiqué (dans le point de vue introduit par Grothendieck. » On trouve donc une forme de distinction entre algèbre (« le discontinu ») et géométrie (« le continu »). Toutefois, cette distinction peut être dépassée ou du moins transcendée par la découverte d'un cadre unificateur.

Ensuite, la distinction « continu-discontinu » rencontrée au niveau des mathématiques « non-fondationnelles » se retrouve au niveau des fondements comme l'explique Salanskis :

« Le conflit entre le continu et le discret concerne donc l'activité logico-mathématique fondationnelle au niveau de sa méthode elle-même. L'option axiomatique ou formaliste, qui s'est montrée de plus en plus dominante au cours de ce siècle, semble réduire les mathématiques et la logique à un jeu linguistique : elle situe celles-ci dans le contexte d'une manipulation de langages symboliques, définis par leur alphabet et leurs règles d'articulation » (Salanskis s.d).

¹⁰ Pour restituer l'œuvre de Grothendieck, cf. Ph. Douroux, « *Alexandre Grothendieck. Sur les traces du dernier génie des mathématiques* », Paris, Allary, 2016.

¹¹ Nous renvoyons ici au beau livre de A. Neeman, *Algebraic and Analytic Geometry*, Cambridge University Press, 2007, qui donne une présentation agréable de la géométrie algébrique avec comme but la preuve du théorème GAGA.

La distinction entre le discret (discontinu) et le continu se marque dans les ensembles de nombres par la différence entre l'ensemble $\mathbb{Z}$ des nombres relatifs et l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels. Il est non-dénombrable (on ne peut compter, faire la liste de ses éléments en utilisant des nombres relatifs). « L'ensemble $\mathbb{Z}$ a la même infinité (le même cardinal) que l'ensemble $\mathbb{N}$, c'est l'infinité baptisée dénombrable, soit l'infinité de ce qui est justiciable d'une énumération, de ce qui s'égrène, s'ordonne en liste selon un principe permettant d'épuiser la totalité. » (Salanskis s.d)

Précisons à partir de quoi Cantor conceptualise la notion de « transfini » : « une échelle illimitée de modes déterminés qui par nature ne sont pas finis, mais infinis, et qui cependant peuvent être précisés, tout comme le fini, par des nombres déterminés, bien définis et distinguables les uns des autres » (Benis-Sinaceur s.d). Le transfini désigne ces ensembles qui, à partir de $\mathbb{N}$ (les naturels), déploient des collections aux cardinaux de plus en plus grands. La notion d'ensemble infini (un ensemble est infini s'il peut être mis en bijection avec un de ses sous-ensembles propres) a reçu avec Cantor une définition rigoureuse qui permet de construire un cadre formel consistant dans lequel le continu (comme $\mathbb{R}$) et le discontinu, le discret (caractérisant des ensembles dénombrables comme $\mathbb{N}$ ou $\mathbb{Z}$) peuvent prendre place et être articulés.

Enfin, il existe donc plusieurs formes de continuités et de ruptures. La continuité est exprimée en fonction d'une logique à partir d'un principe, limite. Or, nous avons vu le dépassement du continu et discontinu en mathématiques non-fondationnelles par la topologie, qui traite des propriétés invariantes sans déformations continues, et le dépassement du continu et du discontinu en mathématiques « fondationnelles » par l'articulation des ensembles de nombres. A présent, mentionnons ceux dont fait état le mathématicien Claude Bruter. Le premier est « le continu substantiel ou physique » et le second est le « continu abstrait ou continu mathématique ». Selon lui, « aucun de ces continus ne peut être entièrement assimilé à l'autre ». Il poursuit en citant H. Weyl, qui caractérisait le continu physique comme intuitif et précisait que « certainement le continu intuitif et le continu mathématique ne coïncident pas, un profond abîme les sépare. » Bruter nomme le continu naturel, ce qui apparaît, « comme un milieu qui puise sans cesse en lui-même une force de renouvellement (...) Il apparaît comme un milieu vivant, éternellement vivant, (...) » Le continu de second ordre réside dans ce qui apparaît de ces mouvements sous-jacents. Ensuite, il écrit que « chaque ordre de continu physique possède sa valeur de vérité intrinsèque ». (Bruter 2001)

Poursuivant l'interprétation philosophique, il ajoute que, dans la pensée réductionniste, on pourrait « reconstruire le tout à partir des éléments. » Cependant, « le passage du tout à la partie s'accompagne de la destruction des tensions internes, de tous les liants qui assurent la cohérence de l'édifice dont le réducteur ne retient que certaines parties homogènes ». La réduction aux parties est donc forcément une diminution de la diversité du réel. En effet, chaque force fondamentale de la physique comporte une échelle de description où il est possible de mentionner une diversité d'observables. La force qui lie les structures à l'échelle astronomique, la gravitation, produit un ensemble de phénomènes propre à cette échelle. A l'opposé, la force électrofaible produit à un autre ensemble de phénomènes propres à une autre échelle, subatomique. Or, l'hypothèse d'une grande unification de ces forces et de leur désolidarisation n'est pour le moment, et ne sera peut-être jamais, une théorie pouvant être mis en perspective du réel.

Concrètement, pour reproduire un tout par la somme de ses parties, il faut les rassembler en respectant « des règles structurelles propres à la nature de ce concret », comme l'écrit Bruter. Or, il existe une diversité de règles structurelles. Ces règles permettraient de faire « ressurgir le jeu des forces d'interaction qui assurent la stabilité du tout. » Nous ne connaissons pas toutes les règles structurelles de l'ensemble des ordres de phénomènes du réel. Ainsi, comme l'écrit encore Bruter, « le réductionnisme absolu est donc une impossibilité dans le monde concret. » Ainsi, nous « voici ramenés au jugement de Socrate (Théétète 204-e) : « Le tout n'est donc pas constitué de parties ; autrement, il serait une somme, étant toutes les parties. » » Une approche philosophique montrant que le continu ne se résorbe pas dans le discret pourrait initier une réflexion sur l'impossible fragmentation ou réduction du tout en parties.

Au contraire de la philosophie réductionniste, il est possible de partir du global vers le particulier. Il s'agit d'ailleurs d'une « approche géométrique moderne, et aujourd'hui acceptée par tous les mathématiciens », comme l'exprime Bruter : « on part du tout pour essayer d'atteindre l'élément ». Ajoutons qu'entre le tout et l'élément se trouve une combinatoire particulière que les mathématiques tentent de décrire dans la diversité des disciplines scientifiques : la combinatoire des lois en physique et la combinatoire des individus par la génétique. Autrement dit, le continu est l'autre nom de l'infini et Bruter termine son hommage en citant Jean Largeault à ce propos : « l'infini est accessible à l'esprit et à l'intuition sous la forme d'un champ de possibilités ouvert à l'infini. » (Bruter 2001).

Pour conclure, ce qui semble important pour notre propos, c'est donc de remarquer à la fois des réussites importantes d'unifications (de la géométrie avec l'algèbre et l'analyse, des descriptions du continu et du discret, ...) mais, en même temps, comme le montre Bruter, une

sorte de résistance à une position réductionniste qui, dans et par l'unification, se priverait de la vitalité stimulante des dialectiques continu-discontinu, tout-partie, nombre-espace, etc.

Conclusion du chapitre 1.

Une diversité de combinatoires en fonction d'un type de système.

Dans la dialectique entre le continu et le discret, nous voyons émerger la notion de cohérence qui la transcende. Nous allons trouver cela en trame d'autres disciplines que les mathématiques, la physique en particulier. Cependant, les mathématiques et la physique possèdent une différence de fondements. Les mathématiques sont, pour nous, la science des relations, alors que la physique est, initialement, la science de la Nature. La différence réside donc dans le fait que la physique doit décrire ce qui correspond au réel, indépendamment de l'action humaine, alors que les mathématiques n'ont pas forcément cette fonction. En effet, elles portent initialement sur des idéautés. Par exemple, la notion de transfini est uniquement conceptuelle. Elle repose seulement sur une idée. En ce sens, les mathématiques rejoignent la philosophie, qui discute de concepts.¹²

En effet, ce débat sur le continu et discontinu n'est pas l'apanage des sciences. En philosophie, le continu est traduit par la notion « d'identité, au Même, à la Permanence » (Salanskis s.d) comme le rappelle Salanskis. Elle implique un raisonnement qui intègre toutes les formes d'impermanence et les transcende. Elle s'apparente à une philosophie première sur la question de l'Être, ou bien à l'aveu qu'il n'est pas concevable.

Pour conclure, la divergence entre les mathématiques, la physique et la philosophie repose sur le type de système. D'une part, les mathématiques sont un système d'énoncés formels. D'autre part, la philosophie s'appuie sur des ensembles de concepts exprimant de manière non-formalisée une pensée. Elle correspond à un système conceptuel. La physique est un système nomologique (un système de lois). Finalement, leur similitude réside dans le fait de mettre en

¹² Nous rejoignons ici la conclusion du livre de D.Parrochia, A. Micali, P.Anglès, *L'unification des mathématiques, Algèbres géométriques, géométrie algébrique, et philosophie de Langlands*, Paris, Hermès-Science, 2012, p.169. Au terme d'une belle analyse où les auteurs montrent que deux mouvements ont conduits aux mathématiques contemporaines (celui qui dépasse l'opposition entre la géométrie-l'espace et l'arithmétique – le nombre et celui qui établit un point entre géométrie et algèbre) en débouchant sur les développements extraordinaires de la géométrie algébrique, ils disent : « il nous a semblé que cette double histoire pouvait inspirer la philosophie (...) c'est l'ensemble du réel qui est structuré, et le domaine de la philosophie, comme celui des sciences humaines, peut assurément bénéficier de l'éclairage des constructions mathématiques. »

œuvre, tous les trois, un langage, où les expressions formelles, ou non, réfèrent à des choses, tout en maintenant une distance avec ces choses, ces réalités.

Par ailleurs, les langages mathématique, philosophique ou physique n'ont pas le même objet, puisque l'un traite des ensembles possibles de relations, de manière formelle, l'autre des relations entre les idées, et le dernier, des lois censées décrire le réel naturel. Cependant, le réel naturel se manifeste par divers ordres de phénomènes et processus très différents. Ainsi, pour rendre compte de cette diversité du réel, il existe une pluralité de disciplines au sein des sciences empirico-formelles. C'est pourquoi, dans la seconde partie, il s'agira de décrire, d'une part, comment procède les sciences empirico-formelles, en général, puis, d'étudier, d'autre part, comment il est possible d'identifier une discipline en fonction d'une « élémentarité » (nous voulons dire d'un type de composant élémentaire caractéristique de la discipline), d'une « combinatoire » (d'une manière propre de combiner les composants élémentaires pour reproduire les objets étudiés), et d'un type de comportement propre, qui la distingue d'une autre, par le système observationnel. Mais, pour le moment, terminons cette partie sur les systèmes symboliques en énonçant quelques arguments formels, dans le second chapitre, sur les limites d'une théorie formelle de tout.

CHAPITRE 2.

Les limites formelles d'une théorie de tout.

Introduction du chapitre 2.

Les limites du formalisme.

Dans ce chapitre, nous allons donner des arguments pour étayer le fait qu'une théorie formelle « de tout » ou « du tout » est difficilement concevable. Nos arguments reposent ici sur l'analyse des limites du formalisme (et plus précisément des langages formels) en considérant des formes possibles de formalisation totalisante. D'une part, ces arguments porteront sur le fondement logique, puis sur l'action de modéliser. D'autre part, ils décriront l'apport philosophique du théorème d'incomplétude de Gödel, les limites du fonctionnement algorithmique, pour terminer sur l'apport philosophique du théorème central-limite. Dans une autre partie, nous aborderons d'autres arguments, qui feront référence à la diversité concrète des niveaux de réalité, qui se reconnaissent par la diversité d'effets émergents.

Plus haut, nous avons montré l'apport du formalisme, sa rigueur et le haut niveau de confiance qu'on lui accorde. Cette excellence méthodologique fait de la physique l'exemplarité des sciences exactes. On pourrait dès lors penser, a priori, que pour qu'une « théorie du tout » soit scientifique, il faudrait qu'elle soit formelle. Mais, la formalisation n'est pas la seule méthode scientifique, les sciences humaines et sociales utilisent, de leur côté, d'autres méthodes rigoureuses que les sciences exactes, dont les caractéristiques leur valent également le qualificatif de scientifique. Il y a donc plusieurs méthodes pour atteindre la connaissance. Or, pour qu'une théorie soit vraiment ultime (« final theory »), elle devrait contenir tous les savoirs obtenus par l'ensemble des domaines scientifiques (sciences exactes et sciences humaines et sociales). Cela nous amène donc à observer un premier argument montrant que l'*idée* d'une théorie vraiment ultime s'avère peu défendable. Nous notons « idée », justement parce qu'il n'y a aucune théorie qui, en 2022, soit formulée et réussirait à unifier toutes les disciplines des sciences dites exactes et des sciences humaines. Les tentatives d'unification se concentrent principalement sur la physique et sur l'unité rêvée de ses deux théories : la mécanique quantique et la relativité générale. Or, il n'y a pas que la physique en sciences exactes ! Nous le verrons

avec la seconde partie, lorsque nous parlerons de la diversité des sciences empirico-formelles et, avec la troisième partie, sur l'apport de la philosophie, puisque la philosophie peut être un autre chemin d'unification.

1. Les fondations rationnelles.

Le premier argument qui montre qu'une théorie vraiment ultime ne serait pas scientifique se fonde sur un raisonnement autour des fondements. Si on suppose que la science explique « tout », il faudrait encore qu'on explique l'existence de la science elle-même. A la suite d'Eddington, on a fait remarquer que : « la science explique le monde mais qui explique la science ? ». De même, à la suite de *L'Action* de Maurice Blondel, on pourrait affirmer que : « la science ne nous suffit pas car elle ne se suffit pas » (pour s'expliquer elle-même, pour s'auto-fonder).

Le premier point est donc de savoir comment justifier la science, et en premier lieu, ses fondements logiques (par exemple, le principe de non-contradiction, ...). Aristote a montré (*Métaphysique*, Livre *Gamma*, chapitre 4) que la justification de ces principes (et de tous les principes fondamentaux de la connaissance, c'est-à-dire ce sans quoi la connaissance ne pourrait pas exister) ne peut se faire par démonstration, car si on démontre le principe de non-contradiction, on doit le faire en supposant que l'on ne se contredit pas. Ce qui est une pétition de principe. On pose au début ce que l'on veut démontrer. Dès lors, on n'a pas de véritable démonstration ! Mais ce que l'on peut faire dit Aristote, c'est *montrer* (pas démontrer !) que dans l'*acte*-même (*in actu exercito*), où l'on nie le principe de non-contradiction, on doit l'utiliser, ce qui montre qu'il s'agit d'une nécessité incontournable de toute connaissance. C'est donc par le passage à une analyse de l'*acte* (pas d'un raisonnement purement formel, c'est-à-dire strictement interne à un langage formel), que l'on peut montrer la nécessité des fondements. Il faut donc sortir du champ propre des sciences formelles pour arriver dans le champ d'une philosophie réflexive qui justifie, de manière critique, les fondements de la connaissance.

Le second point concerne la formalisation de la connaissance scientifique dans un langage. Toute science se fonde sur l'existence d'affirmations du genre (« x est p »). Or, la science ne peut démontrer, que l'affirmation est une nécessité, un fondement, de la connaissance, car pour démontrer, il faut avoir recours à des affirmations, ce qui nous conduirait ici aussi à une pétition de principe. En revanche, je peux montrer que dans l'*acte*-même, où je prétendrais nier toute affirmation, j'en produirais une. Donc, je peux montrer le caractère irréductible de ce

fondement en science, mais cette « monstration » (qui est une véritable « expérience de pensée ») sort du cadre de la science, car elle se base sur une réflexion sur une condition de possibilité du langage de la science.

Pour conclure ce premier argument, rappelons que cette manière de montrer le caractère inévitable, nécessaire, des fondements de la science est appelé la « rétorsion aristotélicienne » ou la « réfutation performative » (car c'est dans les nécessités de l'*acte*, du faire, *to perform*, que se trouve la clef de l'argument) (Isaye 1954). Il n'y a donc pas d'auto-fondation de la science : la science ne peut trouver à l'intérieur de ses méthodes formelles un moyen de fonder sa structure formelle. En revanche, elle peut trouver ce fondement en analysant réflexivement l'acte qui soutient l'activité scientifique, la rationalité. On pourrait analyser l'acte de langage et de pensée à partir des neurosciences, mais de nouveau, il faudrait ici en justifier les fondements, ce qui ne saurait se faire les neurosciences seules, puisque les neurosciences reposent elles-mêmes sur une pensée et un langage. D'où expliquer la pensée et le langage par les neurosciences demanderait de se référer à la pensée et au langage, ce qui serait de nouveau une pétition de principe. La pensée s'explique par les neurones, les neurones par les molécules, les molécules par les atomes, les atomes par les particules élémentaires et celles-ci sont décrites dans un formalisme mathématique, dont les structures proviennent d'une pensée et d'un langage...

2. Les limites de la modélisation : la diversité des possibles.

Le second argument se fondant sur la théorie des modèles concerne une théorie vraiment ultime. Ce que nous appelons ici « théorie véritablement ultime » du, ou de, tout (TVU) est, de manière rigoureuse, un langage formel qui serait susceptible de démontrer ou de réfuter tout énoncé qu'il formule en son sein ou tout langage formel susceptible de décrire tous les énoncés vrais (non pas seulement probables), qui se rapportent à l'ensemble des éléments, dont il est la théorie.

Pour donner sens à ces définitions, nous avons besoin d'énoncer les composantes du langage formel et celles de modèle d'un langage formel. Avant cela, précisons qu'il faut faire attention à ne pas confondre ici la notion de modèle des ingénieurs et des physiciens (qui se réduit à un ensemble d'équations décrivant un phénomène) et celle qui nous utilisons ici et qui signifie un ensemble d'éléments intuitivement connus que décrit le langage formel (le langage formel est

l'analogue d'une théorie constituée d'équations et le modèle est l'analogue d'une représentation simplifiée d'un monde empirique décrit par cette théorie). La notion de modèle est donc celle des logiciens.

Rappelons tout d'abord, qu'un langage formel L est la donnée des quatre ingrédients suivants :

- Premièrement, un ensemble de symboles (par exemple en arithmétique : 0, 1, 2..., +, -, x, (,), =,...)
- Deuxièmement, un ensemble de règles de syntaxe permettant de construire des expressions bien formées (EBF) : c'est-à-dire des expressions renfermant des symboles qui ont un sens dans le langage (par exemple : $1+2=12$ est une EBF (fausse), $1+2=3$ est une EBF (vraie), $1++2=3$ n'est pas une EBF car elle ne respecte pas les règles de syntaxe qui disent qu'on ne peut répéter deux fois un symbole d'opération).
- Troisièmement, un ensemble d'EBF appelés axiomes (exemple : il existe un 0 et il existe une opération S (« successeur ») qui consiste, à partir d'un nombre x, d'engendrer $S(x)=x+1$)
- Quatrièmement, un ensemble de règles de déduction : permettant à partir des axiomes, d'engendrer de nouvelles EBF : les théorèmes de L (par exemple : la règle du modus ponens : si e et f sont des EBF alors de e et de $e \rightarrow f$ on peut déduire f ; règle de transitivité : si e, f et g sont des EBF alors de $e \rightarrow f$ et $f \rightarrow g$ on peut déduire $e \rightarrow g$...)

Ensuite, il convient de comprendre l'interprétation de ce langage formel L au sein d'un modèle (au sens des logiciens). Une interprétation i de L, associe aux EBF des énoncés se rapportant à un ensemble E dont les éléments sont intuitivement connus. Exemple : j'associe à 0, $S(0) = 1$, $S(S(0)) = S(1) = 2$, ... des points régulièrement espacés sur une ligne droite. Ces points sont les éléments de E et forment une interprétation du langage formel de l'arithmétique élémentaire, car chaque EBF (formule) de l'arithmétique peut s'interpréter en termes de ces points sur la ligne.

Un modèle de L est une interprétation de L dans laquelle les axiomes de L correspondent à des énoncés qui sont satisfaits (qui sont « vrais »). Par exemple, l'interprétation donnée ci-dessus (ligne avec une infinité de points espacés) est un modèle de l'arithmétique (l'énoncé : $S(0)+S(0)$

$=S(S(0))$ est vérifié : le successeur de 0 correspond au point « 1 » et le successeur du successeur de 0 correspond au point « 2 » et l'on a bien $1+1=2$). Donnons un contre-exemple. L'interprétation du langage formel L de l'arithmétique qui ferait correspondre à 0 le premier point de la ligne et tous les autres successeurs de 0 au point « 1 » ne serait pas un modèle de L car l'EBF $S(0)+S(0)=S(S(0))$ ne serait pas satisfaite : car il n'y a pas de point « 2 » et on aurait $1+1=1$ car tous les successeurs de 0 sont envoyés sur 1 par cette interprétation.¹³

Le cadre étant posé, nous allons à présent appliquer la théorie des modèles, en en rappelant, un résultat marquant. Le théorème de Löwenheim et Skolem (Ladrière 1969) de la théorie des modèles affirme que si un langage formel L possède un modèle de cardinalité (nombre d'éléments) infinie (un ensemble avec un nombre infini d'éléments), alors il possède des modèles de toutes les cardinalités (ces modèles étant donc non isomorphes). La conséquence logique de cette théorie est la suivante : si une EBF t est un théorème de L (il a donc été déduit pas à pas à partir des axiomes en utilisant les règles de déduction), alors il existe une infinité d'ensembles (des modèles) non-isomorphes, dans lesquels ce théorème s'interprète comme vrai.

Le questionnement philosophique qui en ressort concerne les raisons justifiant de choisir et de privilégier, parmi cette diversité de modèles, l'un plutôt que l'autre. La question est alors comment déterminer un critère de choix d'un modèle privilégié. On peut postuler qu'une théorie $T(L)$ écrite dans un langage formel L existe, et soit capable de répondre à toutes les questions que l'on se pose (l'analogue d'une théorie ultime si l'on veut). Supposons, en outre, que cette théorie possède un modèle de cardinalité infinie (ce n'est pas beaucoup demander. Cela veut dire qu'elle entend décrire des ensembles infinis et c'est le moins que l'on puisse attendre d'une théorie du tout.) On peut imaginer que la théorie $T(L)$ soit la théorie qui décrive (en première approximation) le monde empirique : l'univers (qui peut être fait de plusieurs univers : un « multivers » par exemple). Celui-ci peut être représenté par un, ou plusieurs, ou encore tous les modèles de la théorie $T(L)$. En fait, tous ces modèles sont des représentations possibles de l'univers empirique décrit par $T(L)$.

Mais la question est de savoir, parmi ces possibles, quels sont ceux qui sont effectivement actualisés (réalisés) et correspondent à l'univers. La théorie $T(L)$ ne décrit que des possibilités et non l'actualité. Un peu comme si on pouvait décrire par une théorie (de phylogénie moléculaire), tous les arbres possibles de l'évolution biologique, mais qu'on ne puisse pas, par

¹³ Pour une belle introduction philosophique à la théorie des modèles, cf. A. Badiou, *le concept de modèle* ; Paris, Fayard, 2007.

cette théorie, dire pourquoi celui qui correspond à notre histoire du vivant a été actualisé. La question posée reste donc sans réponse dans la théorie des modèles de T(L). Donc, il existe bel et bien une question à laquelle T(L) ne peut répondre : ce n'est donc pas une théorie du tout (ce n'est qu'une théorie des totalités possibles et non de la totalité actuelle). Souvent, on se contente, dans une réflexion épistémologique, de considérer une théorie des possibles, mais pas une théorie qui, décrivant les possibles, décrit aussi le passage du possible à l'actuel. Mais ceci est essentiel si l'on veut vraiment appréhender une description théorique de la totalité.

Cet argument est intéressant, car il fait la nuance entre tous les « mondes » possibles et ceux qui sont réalisés. Par exemple, j'aurais pu ne pas être, car mes parents auraient pu ne pas se rencontrer. En effet, il s'agissait d'une possibilité. Mais cette possibilité ne s'est pas réalisée. Pour le dire simplement : c'est comme ça, et ce n'est pas autrement, de même pour l'évolution de l'univers ou biologique. Les règles de fonctionnement de notre univers fonctionnent avec ses paramètres, et pas autrement, et s'il fonctionnait autrement, nous ne pourrions pas être là pour en parler. Or, effectivement, j'existe, et je sais que j'existe, car j'ai conscience d'exister.

Cependant, cet argument possède ses limites, car peut-être que l'univers, plus large que celui que nous pouvons appréhender, fonctionne dans certaines de ses parties avec d'autres paramètres, que nous ne pouvons pas connaître. Il y a peut-être plus de possibles réalisés que ceux que je peux concevoir, et donc tous les possibles sont peut-être réels. Cette hypothèse est par exemple celle d'Everett, dans l'interprétation des mondes possibles de la mécanique quantique. A priori, elle se heurte justement au principe de non-contradiction quand on transpose cette idée au monde macroscopique. En effet, si tous les possibles sont réels, cela suppose, qu'à la fois, je suis née et je ne suis pas née. Tegmark décrit aussi ce multivers où tous les possibles sont réels dans sa conception de la réalité mathématique. (Tegmark 2014). Mathématiquement, on peut imaginer dans une hypothèse réaliste que tous les possibles soient réalisés. Cependant, des possibles contradictoires ne seraient pas actualisés au sein d'un même univers. On peut aussi, si l'on adopte une logique paraconsistante considérer que certaines contradictions (« très locales ») soient admises dans le même système formel décrivant un univers mathématique particulier. Mais, en physique, les situations contradictoires appartiennent à des univers parallèles différents, ou à des branches d'univers différentes, issues des actes de mesure, comme dans l'interprétation d'Everett.

Notons que l'adoption de cette interprétation, ou celle classique de Copenhague, n'est pas arbitraire, car l'astrophysicien Aurélien Barrau propose de « trouver une situation où les deux interprétations vont conduire à des prédictions différentes. » (Barrau 2015). En effet,

l'interprétation est un choix philosophique (dont on ne peut valider la pertinence qu'à posteriori). Peut-être même que l'on n'aura pas de critère de choix pour décider de la valeur de deux interprétations qui donneraient le même résultat empirique, mais qui reposerait sur deux présupposés philosophiques différents (par exemple : univers déterministe dans le cas de l'interprétation de Böhm et univers indéterministe dans le cas de l'interprétation de Born-Copenhague). Nous allons nous tourner vers un argument plus convainquant sur la difficulté de constituer une théorie vraiment ultime en faisant appel au théorème d'incomplétude.

3. L'incomplétude d'une théorie : de l'indécidable et de l'indémontrable.

Voyons à présent les versions syntaxique, sémantique, et une conséquence philosophique des théorèmes d'incomplétude de Gödel, mettant en lumière qu'« il y a de l'indécidable » et qu'« il y a du vrai non démontrable », en nous référant à plusieurs publications de Jean Ladrière (Ladrière 1949, 1959 et 1992).

D'un côté, la version « syntaxique » du théorème d'incomplétude de Gödel (1931) montre qu'« il y a de l'indécidable ». Dans tout langage formel L, qui contient les axiomes de l'arithmétique élémentaire, il existe au moins une EBF qui est non-démontrable et, dont la négation est aussi non-démontrable. Autrement dit, il existe toujours dans L au moins un énoncé qui est indécidable du point de vue de la démonstration. Le langage L ne peut ni l'établir, ni le réfuter. Cette démonstration a pour conséquence philosophique qu'une théorie formelle ne peut répondre par oui, ou par non, à toutes questions qu'elle formule de manière rigoureuse. Tout langage formel, aussi puissant fût-il (pour peu qu'il contienne les axiomes de l'arithmétique), ne peut apporter une démonstration, ou une réfutation, à toutes questions qu'il a rigoureusement formulées. Une théorie du tout devrait pouvoir, par définition, répondre rigoureusement à toutes questions rigoureuses ! Or, on voit ici qu'il y a des énoncés sur lesquels toute théorie qui se prétend comme une théorie du tout n'a pas de prise. Cette indécidabilité bloque la possibilité de la construction d'une véritable théorie du tout, au sens d'une théorie qui pourrait démontrer, ou réfuter, tout énoncé rigoureusement formulé dans cette théorie.

D'un autre côté, la version « sémantique » du théorème d'incomplétude de Gödel (1931) montre qu'« il y a du vrai non-démontrable ». Dans tout langage formel L, qui contient les axiomes de l'arithmétique élémentaire, il existe au moins une EBF, qui est non-démontrable et qui, par ailleurs, s'interprète comme vraie (qui est satisfaite) dans un modèle de L. Cette démonstration a pour conséquence philosophique qu'il existe donc des énoncés vrais (dans un modèle d'une théorie T(L) formulée dans un langage formel L) qui sont indémontrables dans

L. Supposons que $T(L)$ soit notre prétendue théorie du tout. Un modèle M de cette théorie peut être vu comme une représentation de notre monde empirique que $T(L)$ décrit en formules par $T(L)$. La théorie du tout est censée décrire (et expliquer) formellement tous les faits empiriques vrais (observés) dans notre monde empirique. Mais, comme il existe des énoncés qui sont vrais dans M et non-démonstrables dans $T(L)$, la théorie du tout ne peut l'être en principe (elle ne peut se dire « théorie de et du tout ») car il existe des faits empiriques véritables qui ne peuvent être décrits par $T(L)$.

Enfin, on peut aussi interpréter le théorème de Gödel en disant que la pensée intuitive du mathématicien est tellement riche qu'elle pourrait atteindre des énoncés vrais, mais qui demeurent inaccessibles à une procédure de démonstration pas à pas en temps fini (c'est-à-dire une procédure algorithmique). Dans la pensée « seulement » mathématique, il existe déjà une richesse d'intuitions qui ne peuvent se résorber dans des procédures de démonstrations formelles. En ce sens, le théorème d'incomplétude de Gödel n'est pas un résultat de limitation, mais plutôt un résultat qui exhibe un champ très riche de la pensée mathématique et logique qui va au-delà de ce que l'on peut représenter dans des langages formels. En somme, cet argument souligne aussi la place de la créativité et de l'intuition dans la construction des théories scientifiques.

4. La nature de cette théorie en question : l'hypothèse algorithmique.

Cet argument repose sur le théorème de Turing selon laquelle : « on ne peut reconnaître *a priori* si une théorie est celle du tout », et est inspiré du livre Gilles Dowek, *Les Métamorphoses du calcul*. (Dowek 2017). En premier lieu, le théorème dit « de l'arrêt » de Turing énonce la chose suivante : soit un algorithme arbitraire A (qui accepte des données et les traite en fournissant un résultat) dans lequel on introduit des données arbitraires I . Il n'existe aucun algorithme T susceptible de répondre par oui ou par non à la question de savoir si A va s'arrêter en un temps fini si on lui donne les données I (*halting problem*). Un algorithme est vu ici comme une procédure logique, qui procède pas à pas, et qui procure un résultat en temps fini lorsqu'on lui fournit des données.

Supposons qu'une théorie du tout $T(L)$ formalisée dans un langage soit vue comme un algorithme qui, en fonction des questions qu'on lui pose (données I) est susceptible de fournir une réponse en temps fini. Si nous observons un monde empirique, nous suscitons de plus en plus de nouvelles questions auxquelles $T(L)$ se doit de répondre si elle est une théorie du tout. Mais, le problème est que l'on ne peut assurer *a priori* que la théorie est bien une théorie du

tout, car il faudrait pour cela prouver que $T(L)$ pourrait toujours répondre en temps fini à toute question qui lui est posée.

Mais le théorème de Turing interdit précisément cela. Il nous est impossible de découvrir une fois pour toute que $T(L)$ est une théorie du tout. On pourrait donc se trouver dans une situation, où l'on possède une théorie du tout sans avoir la possession de prouver qu'elle est bien une telle théorie ! On pourrait faire remarquer qu'un algorithme ne pourra jamais résoudre un problème, dont on peut démontrer *a priori*, qu'il n'existe pas de solution algorithmiquement constructible. Or, il se pourrait qu'il existe des questions issues du monde empirique, dont la réponse ne puisse être fournie par une procédure, pas à pas, en temps fini, c'est-à-dire une procédure algorithmique.

Enfin, on pourrait objecter que le monde pourrait être un algorithme lui-même ! Il pourrait alors s'identifier à la théorie du tout : le monde s'identifiant à sa représentation ! Pourrait-on prouver cela ? Il faudrait prouver que chaque fois que je pose une question (que j'entre des données I) à ma théorie du tout, elle me donne une réponse en temps fini. Mais, il n'existe justement aucun algorithme général qui me permette d'établir cela. Peut-être le monde est-il un algorithme, mais je ne serai pas en mesure de le prouver algorithmiquement. ¹⁴

5. La limite d'une théorie du tout et le théorème central-limite.

Nous voudrions proposer un dernier argument concernant la limite de la théorie. Nous utiliserons ici pour références, et comme source d'inspiration, les ouvrages de Annick Lesne, *Méthodes de renormalisation, phénomènes critiques, chaos, structures fractales* (Lesne, Collet, 1996) et Michel Laguës, Annick Lesne, *Invariances d'échelle : des changements d'états à la turbulence*. (Laguës, Lesne, 2008).

Pour être efficace, une théorie doit préciser ce qu'elle théorise. Si elle souhaite théoriser « tout », elle doit formaliser ce qui sera entendu comme « tout » dans cette théorie. Nous allons nous limiter ici à la physique et prendre en compte le fait que cette discipline met à l'œuvre une multitude de niveaux de description. Prendre en compte l'existence d'une multiplicité de niveaux, d'échelles (particulaires, atomiques, moléculaires, macroscopiques, cosmologiques)

¹⁴ Certains algorithmes sont tels qu'ils tournent en boucle et ne donne jamais de résultat en temps fini. Prenez l'exemple des jeux d'échec (c'est un algorithme !) une configuration vous met en échec et mat. Puis vous vous répondez en me mettant en échec et mat et ainsi de suite : les règles du jeu d'échec (algorithme) sont telles qu'il existe des configurations qui peuvent tourner en boucle et ne jamais permettre que le jeu se finisse. C'est ce que l'on appelle des boucles infinies.

peut donner lieu à de nouvelles raisons de vider de son sens les théories du tout. Et, c'est ce que nous allons faire en proposant un dernier argument bloquant formellement la réalisation effective d'une théorie ultime du tout, par une réduction totale de l'explication scientifique réduite à un et un seul niveau de réalité.

Cet argument a sa source dans l'interprétation du « théorème central limite ». Il s'agit ici d'un argument qui rejoindrait la question de l'émergence et celle du lien entre niveau émergent et explication scientifique. En somme, d'un point de vue épistémologique, on n'est pas obligé de recourir à des niveaux plus fondamentaux (particules...) pour expliquer les phénomènes se passant à des niveaux supérieurs. D'où la légitimité d'un savoir stratifié en disciplines (relativement) irréductibles : physique, chimie, biologie (qui n'a pas besoin des quarks pour décrire le vivant !). D'un point de vue ontologique, cela pourrait signifier que le monde n'est pas nécessairement fait d'un et un seul type de réalité. L'argument sera ici seulement épistémologique. Il se base sur une analyse philosophique du « théorème central-limite » et de la « renormalisation ».

Attardons-nous d'abord à la signification du « théorème central-limite ». Le théorème dit essentiellement que si un phénomène (par exemple macroscopique) repose sur un substrat fait d'un grand nombre d'entités (par exemple microscopiques), dont le comportement est aléatoire, et identique pour toutes celles-ci (les variables aléatoires décrivant chacune de ces entités, X_n , ont même moyenne m et même écart-type σ : déviation caractéristique par rapport à la moyenne m), mais inconnu dans les détails, alors la variable Y_n définie ci-dessous converge vers une loi de Gauss (loi normale) de moyenne nulle et d'écart type 1, notée $\mathcal{N}(0,1)$, qui ne dépend plus des caractéristiques particulières des comportements des entités (microscopiques).

Exprimé en formules, le théorème dit la chose suivante : Si nous considérons une suite de variables aléatoires $X_1, \dots, X_n$ indépendantes et décrites par une même loi (même espérance m et même écart-type σ), alors, lorsque n tend vers l'infini la variable définie par

$$Y_n = \frac{\bar{X}_n - m}{\sigma/\sqrt{n}}$$

converge vers $\mathcal{N}(0,1)$. Autrement dit, la description d'un phénomène reposant sur un grand nombre de « particules élémentaires » (donc à l'échelle d'un grand nombre de particules : c'est le cas du niveau macroscopique) ne dépend en aucun cas des descriptions des comportements précis de ces particules élémentaires. Ici, la loi normale de Gauss $\mathcal{N}(0,1)$ qui décrit un système

comportant une infinité de particules élémentaires ne dépend pas du comportement fin de celles-ci.

Épistémologiquement, cela signifie que l'on peut donner sens à des disciplines qui décriraient des systèmes à une échelle (celle où l'on a un grand nombre de particules par exemple) indépendamment de disciplines qui s'attacheraient à décrire les systèmes élémentaires qui servent de substrat à ce phénomène à une autre échelle. On pourrait ainsi justifier une irréductibilité des disciplines par une sorte de « principe » énonçant, que les détails fins des comportements des éléments s'effacent lorsqu'on passe de leur échelle à une autre. Il est important de réfléchir à cela. Généralement, il faut avouer que l'on ne trouve que peu de réflexions sur les théorèmes centraux-limites, dont il en existe diverses sortes. Le théorème central-limite, que nous venons de voir, est un cas particulier du « groupe de renormalisation », lui-même peu travaillé en épistémologie.¹⁵

Philosophiquement, cela se vérifie dans des ouvrages de physiciens qui décrivent des niveaux de réalité que la physique ne décrit pas. Par exemple, Sean Carroll dans son livre *Le grand tout* (2018) traite de nombreux sujets. Et, il y écrit lui-même qu'il est possible de ne pas faire référence à ce que décrit la physique pour en parler ! Un autre physicien, Muray Gell-Mann dans *Le quark et le jaguar* (1997) décrit la physique comme ce qui est simple, le vivant comme complexe, et poursuit sur des sujets n'ayant pas de rapports avec la physique. Il y évoque aussi une proposition de description en grain, plus ou moins fin.

En somme, la description est relative à l'objet sur lequel on souhaite zoomer, ce pourrait être une particule ou une personne, par exemple. La personne est constituée de particules, mais elle est plus que la somme de ses particules, en particulier parce qu'elle est sensible, comme tous les vivants, parce qu'elle est consciente d'exister, parce qu'elle ressent des émotions, des sentiments et parce qu'elle réalise des actions que des particules ne peuvent pas faire. Elle réalise des fonctions qui nulle part ne peuvent être identifiées comme telles dans les niveaux « particuliers ».

¹⁵ Il y a des exceptions. Nous renvoyons au travail très intéressant de E.Brezin « Fluctuations statistiques et fluctuations quantiques : une prédiction et probabilité dans les sciences, Paris, Frontières, 1998, p.23-36. Cf. p.33-36 sur la philosophie du groupe de renormalisation.

Conclusion du chapitre 2.

Fondements, efficacité et philosophie des mathématiques et de la logique.

Pour conclure, à propos de ces arguments montrant la difficulté d'envisager une théorisation vraiment ultime de tout, nous insisterons sur le fondement idéaliste conduisant à désirer une ultime totalisation. On peut rêver de la constitution d'une TVU (théorie vraiment ultime) ou affirmer dogmatiquement son existence ou sa non-existence. Mais, avant d'affirmer son existence ou son inexistence, il importe de donner des arguments rationnels, car la science n'est pas une croyance. La science nécessite des preuves.

Tout d'abord, il s'agit d'une question de possibilité ou d'impossibilité d'une construction formelle, si cette théorie se veut formelle. Et de nombreux arguments peuvent être avancés pour éclairer cette question. C'est ce que nous venons de faire ici. Mais attention, cela ne veut pas dire que le projet de constitution d'une TVU ou d'une TOE (*theory of everything*) perd son sens. Il peut le conserver en tant qu'horizon, en tant qu'idée régulatrice, qui stimule l'activité des physiciens et des scientifiques, en général, dans la proposition de théories de plus en plus englobantes.

Mais, la TVU ne peut avoir le même statut épistémologique que les autres théories aussi englobantes soient-elles. L'horizon comme tel n'est pas accessible, il est seulement ce qui, en-haut et en-avant, propulse la pensée. La TVU est comme un *telos* (cause finale) de la pensée, une « idée régulatrice » au sens kantien, mais qui ne peut jamais prendre consistance dans le domaine de la pensée formelle (qui n'est pas réellement une « idée constitutive », comme l'eût dit encore une fois Kant), car elle est ce qui la propulse, en quelque sorte, qui en donne l'orientation.

C'est peut-être pour avoir oublié la distinction entre « idée régulatrice » et « idée constitutive » que bon nombre de scientifiques ont transformé le « rêve » motivant et stimulant d'une TOE ou d'une TVU en la « croyance » de l'existence d'une explication théorique parfaitement constituée et ultime de et du tout. Rappelons alors que l'idée constitutive réfère à ce que la sensibilité constitue (dans et par les formes a priori de la sensibilité) c'est-à-dire le phénomène, qui peut être analysé par l'entendement (les sciences). La constitution du phénomène est décrite dans la *Critique de la raison pure*. L'Idée régulatrice ne correspond pas à un phénomène (tout se passe « comme si » s'en était un mais ce n'en est pas un) mais elle guide la pensée dans

l'appréhension des phénomènes. Parmi les idées de la raison : il y a le monde (en totalité), Dieu et l'âme. Pour Kant, ces idées ne peuvent être étudiées comme des phénomènes. Elles ne relèvent pas des sciences mais de la métaphysique. Les idées régulatrices sont décrites dans *La Critique de la faculté de juger*.

L'idée de Théorie ultime relève plus de l'idée régulatrice qui guide et oriente le domaine de l'entendement (des sciences), mais le projet de réalisation d'une telle théorie ne peut aboutir ! Les arguments que nous avons fournis montrent en fait qu'un essai de réalisation d'une TVU dans le champ des sciences ne peut aboutir qu'à des antinomies ou à des obstructions logiques.

Même lorsqu'on aura unifié la mécanique quantique et la relativité, on n'aura pas du tout progressé dans le sens de la possibilité d'une véritable théorie ultime du tout. Car, justement, comme nous verrons dans la partie suivante avec les arguments de Kauffman, la biologie, par exemple, ne peut se réduire totalement à une théorie physique, aussi vaste et unifiée soit-elle. On doit effectivement renoncer au rêve d'une théorie du tout (cosmos, vie, humain...) qui serait formulée uniquement en termes mathématiques, comme en physique. Mais est-ce problématique ? Non, car sortir de la rationalité mobilisée par la physique ne signifie nullement échapper à toute rationalité. Il s'agit plutôt de découvrir d'autres champs rationnels.

Enfin, les limites d'un tout formel ouvre sur trois sujets : Le premier concerne l'efficacité des mathématiques, le second porte sur les questions philosophiques propres aux mathématiques et le troisième sur un des pans de la philosophie des sciences : la philosophie de la logique.¹⁶

D'une part, l'efficacité des mathématiques peut s'expliquer dans des philosophies variées (Lambert 1999) : platonisme, empirisme (Aristote) ou idéalisme kantien, voir le naturalisme à la Changeux-Dehaene. Cette efficacité est attestée en physique et est peut-être liée au fait que cette discipline s'attache surtout à des situations caractérisées par des grandeurs invariantes et des lois universelles, sur lesquelles les mathématiques ont pris. Mais la biologie et encore plus les sciences humaines rencontrent des situations marquées par la contingence, la particularité, l'unicité... Caractéristiques qui échappent à une modélisation et aux lois universelles (pensons aux contingences imprédictibles qui font l'histoire de la vie et de l'humain).

¹⁶ Sur le sujet, nous renvoyons en particulier sur les textes clés rassemblés dans l'ouvrage paru chez Vrin, *Philosophie de la logique*.

D'autre part, le choix des Symboles et des Axiomes, mais aussi des Règles d'Inférence, est lié non pas à une procédure formelle (qui serait définie dans le langage formel) mais à des intuitions, des présupposés des finalités qui sont externes au langage formel. Une philosophie des mathématiques va réfléchir sur l'origine et la signification de ce choix : y a-t-il des réalités qui se rapportent aux axiomes ? Qu'est-ce qui motive le choix d'une logique (classique, intuitionniste, ...) particulière... Par exemple, quelle est l'origine de la notion de nombre décrit par les axiomes de Peano ? Quelle est l'origine des Axiomes de la géométrie euclidienne, sont-ce des conventions arbitraires ou des exigences venant de la nécessité de mesurer, d'arpenter... ? Quel est le fondement de la notion d'opération ? Des gestes : assembler, distinguer, séparer, réunir, mélanger, ... ? Or, ce sont des questions philosophiques extérieures au langage formel, et auquel un langage formel ne pourrait donc pas répondre.

CHAPITRE 3

Les systèmes observationnels des sciences empirico-formelles :

Des connaissances associant expérimentation et théorie.

Introduction du chapitre 3.

L'unité des sciences empirico-formelles : **la méthode de justification hypothético-déductive.**

L'objectif de ce second chapitre est de présenter ce que sont les sciences empirico-formelles et sur quoi repose l'unité de cette diversité de disciplines : la méthode hypothético-déductive. Tout d'abord, nous évoquerons l'évolution de la méthode empirique, où la preuve réside dans l'expérience, en une méthode de justification hypothético-déductive. Nous mentionnerons la place de l'hypothèse dans ces sciences, puis le recours au langage pour sa formulation et l'usage des mathématiques, en particulier des équations, pour l'expression exacte de ses contenus.

Cela nous amènera à considérer le fait qu'en recourant à l'expérimentation, une diversité de phénomènes se manifeste. Or, la théorie physique a pour objet de trouver un lien au sein d'une diversité de phénomènes observables et une correspondance avec le réel. La théorie est donc unificatrice par nature et l'hypothèse caractérise ce lien. La théorisation engendre une diversité possible de théories et ces théories correspondent potentiellement à la diversité des ordres de phénomènes.

Ensuite, pour vérifier l'adéquation entre l'exactitude du formalisme d'une théorie avec un ordre de phénomènes observables, il s'agit donc de pouvoir mesurer une régularité permettant d'identifier une grandeur. Mais, il en existe aussi plusieurs et la mesure est également relative à l'instrument. Il s'agit donc d'examiner comment cette diversité de théories coexiste au sein d'une discipline en fonction de son objet de recherche fondamental. Cela nous ouvrira à la diversité disciplinaire des sciences empirico-formelles, que nous traiterons dans la seconde partie.

1. La preuve par l'expérience.

Les sciences empirico-formelles regroupent les disciplines qui recourent à la modélisation, comme la physique, la biologie et les neurosciences. La modélisation renvoie à l'usage des mathématiques, qui permettent de représenter symboliquement des structures sous-jacentes à la diversité des phénomènes. Cependant, les structures sont aussi variées en fonction des disciplines et des branches des disciplines. Clarifions donc tout d'abord la notion de phénomène et l'évolution de la méthode qui les examine, la méthode empirique, devenue, la méthode hypothético-déductive.

Le phénomène est le mot utilisé pour traduire quelque chose qui se montre. Or, ce qui se montre prend une diversité d'aspects. Plus généralement, le phénomène correspond à cette diversité des faits extérieurs dont on prend conscience. Dans ce sens, le phénomène n'est donc pas neutre puisqu'il est relatif à notre perception. Le phénomène peut être l'objet d'une réflexion spécifique de la philosophie comme c'est le cas dans la phénoménologie. Ainsi, la question se pose de savoir si on peut connaître la réalité indépendamment du phénomène. Si le phénomène « apparaît aux sens », comme l'écrit le philosophe Alexander Schnell, dans *Qu'est-ce que le phénomène*, le phénomène n'est pas la réalité, mais seulement ce qui paraît en fonction de nos instruments sensoriels. La représentation du réel correspondra donc à l'association entre des stimuli extérieurs et des modes de réception et d'interprétation de ceux-ci.

Toutefois, Schnell explique que la signification de ce terme évolua avec Kant. Pour Kant, dans l'Esthétique transcendentale, le phénomène n'est plus seulement entendu au sens du détectable par la sensibilité, mais à partir du « statut d'une connaissance théorique en général ». (Schnell 2014). Il est ce qui se constitue en nous au travers les formes a priori de la sensibilité. Le phénomène nous intéresse donc dans le sens où il est mis en rapport avec une théorie. Par exemple, le phénomène de la couleur est un objet de la psychophysique appelé la colorimétrie. La question du phénomène renvoie à la distinction dualiste entre un objet, extérieur, et son observateur. Or, l'objet extérieur, dans le cas de la colorimétrie, est l'onde électromagnétique, et l'observateur est l'expérimentateur. Mais l'expérimentation est relative à l'instrument de détection : l'œil. Le phénomène de couleur renvoie donc à une théorie générale, celle de la perception. La question se pose à nouveau de savoir comment obtenir une connaissance « objective », donc indépendante de la variabilité des instruments de détection.

Depuis Parménide et Platon, la volonté d'acquérir une connaissance objective de la réalité indépendante est caractérisée par la notion de stabilité. En outre, Schnell explique qu'une connaissance pour être caractérisée comme telle doit être universelle selon la conception kantienne : « Si ce qu'elle affirme est « vrai » à un moment et « faux » à un autre, alors on n'a pas affaire à une connaissance. » (Schnell 2014). Mais, pour Hume, ces deux notions d'universalité et de nécessité posent problème car, selon lui, si toute connaissance part « de l'expérience sensible et dans la mesure où, par ailleurs cette expérience ne nous met jamais en rapport qu'à des cas de figure singuliers, toute généralité ne peut valoir que pour l'ensemble de ces cas de figures observés, mais jamais pour « tout » cas de figure « en général » ». (Schnell 2014). Cette idée repose sur un type de raisonnement, l'induction, et une conception de la science, l'empirisme, dont il faut à présent dire quelques mots.

Historiquement, l'empirisme est un courant philosophique qui remonte à l'antiquité grecque. A l'époque, il s'agit d'une « forme de scepticisme », d'analyse « des critères du jugement », une « méthode critique » en opposition à « la méthode « dogmatique », notamment « des aristotéliens, des épicuriens, des stoïciens », comme l'explique Edmond Ortigues dans un article encyclopédique sur ce courant. Pour ces penseurs, rattachés à l'école de Pyrrhon, le doute est « une méthode de recherche consistant d'abord à comparer des phénomènes ou des pensées (noumènes) jusqu'à faire apparaître des « antithèses » en présence desquelles il est sage de suspendre son jugement ». Cette suspension de jugement est nommée « épochè » (Ortigues s.d).

Au XIX^{ème} siècle, l'empirisme prend une autre signification. Il est rattaché au rationalisme en rapport au contexte intellectuel de l'époque. Cette redéfinition de l'empirisme conduit à catégoriser, par exemple, le rationaliste Locke comme « père de l'empirisme ». De plus, Bacon est classé dans cette même catégorie. Pourtant, il l'a critiquée et il cherchait davantage une voie entre les deux, synthétique, qu'il qualifiait en ces termes :

« Les empiriques, à la manière des fourmis, se contentent d'amasser et de faire usage ; les rationnels, à la manière des araignées, tissent des toiles à partir de leur propre substance, mais la méthode de l'abeille tient le milieu, elle recueille sa matière des fleurs des jardins et des champs, puis elle transforme et la digère par une faculté qui lui est propre. Le vrai travail de la philosophie est à cette image. (...) Aussi d'une alliance plus étroite et plus respectée entre ces deux facultés, expérimentale et rationnelle, alliance qui reste à former. » (Ortigues s.d).

Cette citation illustre la distinction qui subsiste aujourd'hui entre l'empirisme des sciences empirico-formelles, qui associent formalisme et instrumentation, mais où la diversité subsiste par la pluralité des théories, et le rationalisme des sciences formelles, dont la justification ne requiert pas forcément une application, mais dont la méthode renvoie finalement aux facultés cognitives.

Par ailleurs, la valorisation de l'induction, qui part des faits pour en faire une généralité, une loi, vient de Newton (1643-1727). En outre, l'association de l'hypothèse et de la méthode déductive, en une méthode hypothético-déductive, apparaît au XIX^{ème} siècle. Quant à l'étude de l'hypothèse, elle est plus fréquente au XX^{ème} siècle, notamment avec l'œuvre de Poincaré. La distinction entre induction et hypothèse est formulée par Quine : « L'induction n'est pas une procédure alternative à l'hypothèse (...), c'est un cas d'hypothèse » (Ortiguès s.d).

L'induction pose la question de sa nature. En l'occurrence, la nature des lois de la physique. Elle peut être comprise soit comme une méthode, qui consiste à identifier les régularités, soit comme une logique, qui articule en un ensemble une diversité de données. Selon Edmond Ortiguès l'induction renvoie à ce qui est crédible et la déduction à une règle : « L'explication est déductive, la crédibilité est inductive, allant des conséquences aux prémisses (...) ». En effet, par exemple, comme l'alternance entre jour et nuit se manifeste sur Terre, on peut croire qu'elle se manifestera encore demain, puisqu'elle s'est manifestée hier. L'induction renvoie à une fréquence d'un ordre de phénomènes, de faits.

Au contraire, la déduction renvoie à l'explication et à la signification des termes d'un langage en fonction d'une détermination. Par exemple, on peut effectuer le raisonnement suivant. Comme je vous ai dit être végétarienne, je ne mange pas de viande. La prémisses est la signification du terme végétarien. Par conséquent, il est logique de ne pas manger de viande quand on est végétarien, puisque le végétarisme est un régime alimentaire sans viande. Par contre, il n'est pas logique que le jour réapparaisse demain matin. Seulement, c'est probable et prédictible.

Fondamentalement, l'empirisme relève de l'expérience. Or, ce qui se montre est un élément de preuve. Mais, comme le rappelle Edmond Ortiguès, « un changement décisif à partir de 1930 environ, a consisté dans l'abandon du phénoménalisme, c'est-à-dire de la thèse selon laquelle les phénomènes immédiatement donnés comme qualités sensorielles (sense data) seraient le fondement le plus certain de la connaissance ».

Ainsi, l'auteur évoque aussi la tentative de Carnap de décrire le monde par la logique, puis son renoncement. Enfin, dans la méthode empirique, il faut insister sur le fait que l'expérience arrive en fin de processus comme un élément de confirmation, ou de moins de soutien d'une théorie formulée autour d'une hypothèse. En somme, il y a un biais cognitif dans le sens où on attend que l'expérience appuie ce qui est affirmé et pour cela toutes les conditions expérimentales doivent être rassemblées.

Il est possible de conclure avec Edmond Ortiguès que : « C'est la théorie mathématique des probabilités qui permet de raisonner sur les possibilités attendues ou sur les nécessités (lorsque la probabilité est égale à 1) ; mais c'est du côté de l'action humaine que l'on se tournera pour chercher l'explication des modalités, car c'est toujours dans nos attentes que s'enracinent les idées de ce qui peut être ou doit être. » (Ortiguès s.d).

Or, d'une part, la probabilité sous-tend l'idée d'un déjà vu, car on ne peut émettre l'hypothèse d'une reproduction que de ce qui est déjà connu. Par exemple, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une particule se comporte comme une onde, ou comme un corpuscule, car ces deux comportements ont été observés. D'autre part, la probabilité de réapparition d'une chose sous-tend aussi le contexte d'apparition de cette chose. Autre exemple, il est probable que le soleil soit présent demain, car j'ai l'habitude de l'observer dans le ciel, chaque jour. Mais un jour, je ne serai plus là pour le voir, et il sera (probablement) toujours là. Cependant, un autre jour, lui aussi disparaîtra.

De plus, si le probable est calculable, en particulier en termes de fonctions de probabilités, il est néanmoins relatif à un langage pour le signifier et à un contexte pour le décrire. Cela ouvre à un troisième choix de justification, celui des sciences herméneutiques, qui intègrent le contexte. Ainsi, le contexte de l'expérimentation est relatif à l'hypothèse. La construction des instruments, tels que le LHC à Genève, repose sur l'hypothèse de l'existence de particules et de la capacité de comprendre leur fonctionnement par un type particulier d'expérience : la collision de particules. Nous allons donc à présent décrire ce qui conduit au choix de l'hypothèse.

2. L'expérience relative à l'hypothèse et la notion de crédibilité.

La différence essentielle entre les sciences formelles et les sciences empirico-formelles, réside dans le fait que ces dernières se rapportent à un objet extérieur, alors que les premières sont entièrement basées sur la cohérence interne de langages. Selon Ladrière, cet objet extérieur est

« donné dans l'expérience empirique : la réalité matérielle, considérée dans ses manifestations non vivantes. » (Ladrière s.d).

Cependant, cet objet apparaît dans le cadre d'une expérience, en fonction d'instruments et d'une méthode d'interprétation des données. L'objet extérieur révélé par l'expérience est donc plus artificiel, construit avec l'empreinte humaine, que naturel. L'expérience est relative à une conjecture formalisée dans une hypothèse, un postulat. Ainsi, pour Jean Ladrière, la physique a montré les limites de l'induction, « (...) l'a priori des théories et la limite des généralisations », puisqu'en effet, l'expérimentation est relative à la théorie et la théorie est relative à l'hypothèse.

Étudions donc un peu plus la notion de théorie. Par exemple, Galilée réalise des expériences autour d'une recherche sur la chute des corps. Dans ce contexte, la compréhension d'un phénomène est décrite par une théorie et confirmée par l'expérience. La théorie donne donc le cadre de l'expérience, le champ du savoir et de son application. Pour cela, la science recourt au langage en utilisant des concepts. Par exemple, dans la connaissance de la chute des corps, il faut savoir ce qui est entendu par « corps ». Dans ce cadre théorique, le corps est un objet massif. Il est donc établi des propriétés inhérentes à l'objet où une propriété est l'une des caractéristiques de quelque chose.

De plus, une théorie physique est une construction logique. Elle articule différents concepts, d'où le trait d'union dans la dénomination de science « empirico-formelle ». En effet, les théories sont des ensembles de propositions cohérentes, donc logiques. En l'occurrence, ce qui est expliqué par Galilée est la trajectoire de la chute des corps. En général, tous les corps chutent dans le vide avec la même accélération. Il est donc possible d'énoncer une loi. Mais, effectivement, il est rare que les corps soient dans le vide. En effet, les corps sont en interaction avec d'autres corps et un corps subsiste dans un certain milieu. Par exemple, le corps humain ne subsiste pas sans équipement dans l'espace car il a besoin d'oxygène. Ainsi, la loi décrit une « norme ». Elle possède donc une valeur prédictive dans les conditions énoncées par la théorie. Cependant, elle ne correspond pas toujours à l'ensemble de la réalité étudiée. La norme est donc finalement le cas particulier de référence, la règle, qui parfois fait exception, mais elle permet d'obtenir un repère précisément par son invariance. Une théorie est donc, par essence, limitée par un choix de concepts, un objet, des conditions initiales et limites, aux frontières, qui permettent de définir le cadre expérimental. Ensuite, l'hypothèse émise est confirmée, ou non, selon ce cadre. Le modèle est ici « l'intermédiaire entre la théorie et la réalité physique » et « les termes descriptifs d'une théorie sont mis en correspondance avec les composantes du modèle (entités, propriétés et relations) » (Ladrière s.d). Ce mode de justification permet de

montrer l'applicabilité d'une théorie à la réalité concrète. La justification confère donc une valeur de réalité à la théorie. Par exemple, l'hypothèse qu'il existe des cordes, dans la théorie du même nom, doit trouver des confirmations dans le réel observable pour devenir une connaissance et non rester une spéculation. De même, l'hypothèse d'un « plurivers » doit trouver aussi des éléments de confirmation, des preuves, dans le réel, sinon, elle reste aussi une pure spéculation.

Cependant, on ne peut pas affirmer que quelque chose n'existe pas parce qu'on n'en a pas fait l'expérience. Par exemple, on ne pouvait pas affirmer qu'il n'existait rien sous l'atome, même si on ne pouvait pas explorer ce qui existait à une échelle inférieure. « L'absence de preuve n'est pas preuve de l'absence ! » En l'occurrence, nous savons à présent que des particules existent et nous pouvons les classer. Ainsi, la connaissance progresse vers une description plus fine de la matière. Par ailleurs, confirmer n'est pas vérifier. Une expérience peut confirmer une théorie, mais « de prémices fausses peut parfaitement découler une conséquence vraie », alors que « de prémisses vraies ne peut découler une conséquence fausse ». (Ladrière s.d) L'attention est donc à porter sur la prémisse, l'hypothèse, qui sert de point de départ à la démonstration mathématique, donc logique. D'une part, ce type de « démarche cognitive » se retrouve dans plusieurs sciences et chaque science possède ses propres modèles. Le modèle de l'évolution des espèces n'est pas le modèle de l'évolution de l'Univers. Ainsi, la question est déplacée de l'expérience au choix des théories, qui détermineront les expériences, et surtout aux hypothèses qui seront mises à l'épreuve d'un réel pour être considérées comme des connaissances et pas seulement des spéculations intellectuelles.

Tout d'abord, l'hypothèse doit être crédible. Le critère de crédibilité est proposé par Satosi Watanabé et évalué en fonction des hypothèses concurrentes. Ensuite, une hypothèse doit pouvoir être confirmée. Le biologiste et philosophe, Bernard Feltz explique cette condition et la première, en ces termes :

« La confirmabilité vise en fait le degré de confirmation évidentielle de l'hypothèse. (...) La crédibilité d'une hypothèse vise le degré de confiance accordé à l'hypothèse. Cette crédibilité est liée à une évaluation globale de l'hypothèse qui inclus aussi bien des facteurs évidentiels que des factuels extraévidentiels. » (Feltz 2002).

Comme facteurs extraévidentiels, le physicien théoricien Satosi Watanabe nomme, notamment, la présence des hypothèses concurrentes, mais aussi « la position de l'hypothèse dans la construction de la théorie, la préférence a priori pour certains prédicats, divers facteurs

circonstanciels. » (Feltz 2002) Ces éléments posent donc la science dans sa démarche contextuelle, ce qui paraît plus crédible et évident selon l'état des connaissances de l'époque. Il faut donc souligner l'historicité des connaissances. Or, cela nous conduit vers les sciences herméneutiques.

3. L'hypothèse formulée dans un langage et la place de l'interprétation.

Jean Ladrière nomme un troisième type de connaissances, l'herméneutique, qui est la science de l'interprétation. L'herméneutique se propose de déchiffrer, à partir des « effets visibles », le « discours caché », soit dans la psychologie intentionnelle, soit par l'interprétation associée à la pratique psychanalytique. Autrement dit, l'herméneutique peut traiter des sciences, qui sont des constructions humaines et évolutives. Mais, l'évocation de ces disciplines amène Jean Ladrière à s'interroger encore sur la caractérisation de ce type de savoir : « Serait scientifique tout savoir qui aurait réussi à inscrire ses pratiques (constructives, déductives, expérimentales, évaluatives, voire fondationnelles) dans le cadre d'un jeu réglé d'opérations, c'est-à-dire de transformations régies par des schémas formels. » (Ladrière s.d).

Certes, la méthode de justification des connaissances en sciences humaines et sociales n'est pas celle des sciences formelles ou des sciences empirico-formelles. Cependant, ces disciplines sont aussi scientifiques parce qu'elles décrivent des faits et s'attachent à l'objectivité de la description. Le contenu de la connaissance est alors relatif à la circonscription en fonction d'un terrain et à une méthodologie d'enquête. Face à la rigueur de la méthode des mathématiques, les résultats de ces études peuvent paraître moins standardisés. Cependant, les sciences humaines et sociales peuvent aussi recourir à des méthodes statistiques. Mais la description statistique, ou plus largement mathématique, ne sont pas les seules manières possibles d'aborder le monde. La manière de décrire est relative à la manière de détecter et d'exprimer.

Dans l'ouvrage *Qu'est-ce qu'interpréter*, de Guy Deniau, la relation entre les mots et les choses est mise en perspective et l'auteur cite le philosophe Friedrich Nietzsche, qui interpelle les physiciens sur leur fondement nomologique : « (...) Mais ces « lois de la nature », dont, vous, physiciens parlez avec tant d'orgueil, ces lois où tout se passe, (...) Elles n'ont aucun contenu réel (...) » (Deniau 2015). Pour Nietzsche, ces lois de la physique ne sont pas réelles car elles sont abstraites et correspondent seulement au monde des équations.

Ensuite, l'interprétation pose la question des manières d'interpréter. La signification des mots et des concepts évolue au fil de l'histoire. La transposition d'un mot, selon les époques, doit tenir compte de son étymologie et du contexte historique dans lequel ce mot a été utilisé. Dans *Vérité et méthode*, Hans-George Gadamer souligne que « penser historiquement signifie opérer la transposition que subissent alors les concepts du passé quand nous essayons de penser en eux. » (Gadamer 2005) Alors, la compréhension sous-tend l'intégration contextuelle d'un énoncé ou d'un événement. En outre, face à la complexité du langage, à partir duquel il est possible de mentir, la finalité du langage se pose. Transmettre une information à l'autre semble sa vocation élémentaire, mais cette information peut être vraie ou fausse, autrement dit correspondre à un fait ou non. A l'information est donc associée une intention.

Fondamentalement, Jean-Jacques Rousseau revient sur la finalité et l'évolution du recours du langage :

« le premier langage de l'homme, (...) le seul dont il eut besoin, (...) est le cri de la nature. (...) ce cri n'était arraché que par une sorte d'instinct dans les occasions pressentes, pour implorer du secours (...) Quand les idées des hommes commencèrent à s'étendre (...) ils cherchèrent des signes plus nombreux (...) »¹⁷

Le langage est symbolique et il est devenu un apprentissage de signes codés qu'il s'agit de déchiffrer pour en comprendre le sens, sans oublier de considérer la diversité possible d'intentions de son émetteur. La correspondance entre les notions de volonté et de signification est au cœur du langage. Ce que l'on veut dire et faire comprendre peut passer par des signes, des gestes, des schèmes au sens kantien. Ainsi, il ne s'agit pas uniquement de connaître la convention exprimée par un signe, il faut aussi discerner l'intention et la volonté de celui qui l'utilise. Par exemple, la communication d'une connaissance scientifique peut être faite dans l'intention d'instruire une personne, mais derrière cette intention de partager un savoir peut se trouver une volonté d'imposer une représentation du monde où prédomine la raison. Derrière cet apport, il peut donc exister une intention de domination ou de pouvoir, voire, une idéologie. N'oublions pas que c'est notamment par le savoir que se sont développés certains aspects de la colonisation.

Affirmer que l'on sait et que l'on va apprendre à l'autre, c'est établir dès le départ de la relation, un lien de subordination et une hiérarchie. Or, ce lien peut être utilisé de différentes manières.

¹⁷ Rousseau cité par Deniau p.108-109, citation originale de Rousseau dans *Discours sur l'origine et les fondements de l'inégalité parmi les hommes*.

Il est donc nécessaire de connaître les valeurs de l'enseignant avant de s'intéresser à ce qu'il enseigne et de conserver un esprit critique. La fin de l'enseignement correspond-elle à la volonté de puissance d'un état, d'un ego, d'une civilisation, d'une idéologie ou à la quête d'une valeur comme la recherche de la vérité ou du bien commun ?

Initialement, l'intention de la communication est d'être vrai, l'une des fonctions du langage est la communication entre pensées, des va-et-vient entre des questions et des réponses qui appellent de nouvelles questions. Arthur Schopenhauer, qui se tourne aussi vers la philosophie et la science, retrouve également cette pluralité de métamorphoses et la question du choix de l'inclinaison de la pensée:

« La morphologie nous présente des formes en nombre incommensurable et en une diversité infinie. (...) A l'inverse, l'étiologie nous enseigne que, conformément à la loi de cause à effet, tel état déterminé de la matière entraîne tel autre, et c'est là la manière avec laquelle elle l'a expliquée et fait sienne. », selon sa détermination. (Schopenhauer 2009).

Pour conclure, une interprétation est une forme de description en fonction d'un langage, du point de vue d'un observateur à propos d'un objet. Or, les objets en science sont aussi nombreux que les disciplines. Cependant, le langage des sciences exactes est celui des mathématiques. En cela, les mathématiques unifient au moins une partie des disciplines et l'ensemble des sciences en visant la nature. Dans les sciences empirico-formelles, un élément de preuve de la justesse d'une théorie est l'apport d'une preuve par la mesure. Mais les manières de mesurer augmentent avec l'apparition de nouvelles techniques et de nouveaux instruments.

Nous observons donc une historicité des connaissances et leur évolution en fonction de la construction de nouveaux instruments (lunette astronomique, télescope, etc.). Ainsi, nous pouvons observer des phénomènes à des ordres de grandeur supérieurs à nos sens. Cependant, cela ne signifie pas que les connaissances précédentes étaient fausses, mais plutôt incomplètes, comme celles de notre époque le sont encore aussi, puisque la connaissance scientifique augmente dans ses différents domaines.

On aurait pu penser que les sciences formelles et empirico-formelles échappent à une dimension herméneutique interprétative. Mais il n'en est rien, car ces disciplines, même si elles ne l'admettraient pas volontiers, révèlent des aspects contextuels, historiques, et humains qui se révèlent dans des choix, des présupposés que l'on peut observer avec le recul et qui sont constitutives des paradigmes qui les sous-tendent. Le projet d'unification des savoirs occulte

ces choix et présupposés paradigmatiques qui révèlent une connaissance humaine ouverte, historique et évolutive, impossible d'appréhender par une cohérence unificatrice rigide et donnée a priori.

4. Le langage mathématique et son usage dans les sciences physiques.

Il nous faut revenir un moment sur la place occupée par les mathématiques dans les sciences physiques. Les phénomènes à l'échelle subatomique sont décrits entre termes d'interactions dites fondamentales. Mais, avant d'en arriver là, il a fallu passer par une diversité d'unifications.

Les équations de Maxwell unifient la force électrique et magnétique en un formalisme mathématique fondé sur le champ électromagnétique. Ainsi, cette théorie a rassemblé en quatre équations la description des phénomènes électriques et phénomènes magnétiques, ces derniers étant déjà envisagés comme effet des « mouvements » des électrons. Puis, l'interaction électromagnétique fût associée dans la théorie électrofaible à l'interaction faible, cause notamment de la radioactivité bêta. La force dite « forte », responsable de la cohésion du noyau atomique, fût quant à elle décrite par la théorie de la chromodynamique quantique (QCD). Toutes ces théories s'unifièrent au sein du formalisme mathématique de la théorie de jauge. Les équations de cette théorie permettent de décrire concisément ces diverses interactions et d'exprimer leur unité.

Nous observons donc plusieurs faits relevant de l'histoire de la physique. L'unification est réalisée en termes mathématiques par des équations. L'équation décrit une relation entre des variables. Par exemple, dans la célèbre équation d'Einstein, l'énergie, E , est mise en correspondance avec la masse, M , par le biais de la vitesse de la lumière, C , qui est un invariant. L'hypothèse est qu'il y a une énergie contenue, E , dans la masse, M , qui libérée correspond à la masse multipliée par C au carré. En réalité, cette équation n'est valable que si l'on considère un système au repos (quantité de mouvement $p=0$ par rapport à son référentiel propre). Si p est différent de 0, on doit écrire $E^2=p^2 C^2+M^2 C^4$, où M est la masse au repos. L'équation faisant apparaître un fait nouveau : des particules peuvent avoir une énergie sans avoir de masse en repos, ce qui est le cas du photon qui sera, en mécanique quantique, décrit comme une onde ! Concrètement, la véracité de cette équation se vérifie dans les applications de la physique nucléaire, en particulier avec la construction de la bombe atomique.

Par ailleurs, la théorie de la gravitation d'Einstein, la Relativité Générale, est un élargissement de la théorie de la gravitation de Newton. Un élargissement du champ des connaissances correspond à une intégration des connaissances précédentes dans un nouveau formalisme. En ce sens, il y a une « absorption » de théories physiques par d'autres. Ensuite, cette « absorption » doit être précisée. En l'occurrence, la force de gravitation, responsable de l'attraction entre deux objets massifs, est décrite dans la théorie de la Relativité Générale autrement que dans la théorie de la gravitation universelle de Newton, en éliminant la notion de force dans un formalisme géométrique. La gravitation de Newton est intégrée en éliminant sa notion essentielle de force. Cependant, elle peut être retrouvée comme une approximation de la Relativité Générale. On a ici un exemple de théorie aux concepts différents mais qui peuvent être néanmoins articulés.

Aujourd'hui, l'unification entre la force de gravitation et les autres forces n'est pas encore formalisée. Il est fort possible que cette unification se réalisera. Mais cela ne signifiera pas la disparition des descriptions plus anciennes. Ainsi, comme la mécanique de Newton reste parfaitement valide aux basses vitesses, même après l'avènement de la relativité restreinte, la relativité générale restera parfaitement valide et féconde dans son domaine (par exemple au niveau du Cosmos, même après la découverte (tant espérée) d'une théorie de gravité quantique. En physique, les mathématiques jouent donc un rôle unificateur. Mais qu'en est-il dans d'autres sciences ? Nous y reviendrons.

Conclusion du chapitre 3.

Une unification instrumentale.

Si nous cherchons à unifier les sciences de la nature, nous retrouvons deux éléments irréductibles :

- Le premier est le domaine théorique d'une discipline scientifique qui étudie la formalisation mathématique de son domaine. Les remarques que nous venons de faire montrent que même s'il existe des formalismes mathématiques unifiés, on garde en fait en pratique une multitude de théories valides dans des domaines et des échelles particulières.
- Le second est le domaine expérimental dépendant d'un instrument et d'une méthode de mesure. Le physicien Michel Soutif explique que le travail d'expérimentation ne se

réduit pas à la mesure d'un résultat. Il s'agit aussi de déterminer la marge d'erreur liée « à la sensibilité de l'appareil », mais aussi aux autres erreurs possibles, comme « les erreurs introduites dans la réalisation de la cellule de mesure, dans l'obtention d'un échantillon bien défini, dans l'enregistrement des données et le déroulement des calculs ». ¹⁸ L'unification des connaissances est aussi liée à l'émergence de dispositifs expérimentaux ou observationnels qui, d'une certaine manière, « incarne » les théories et les soutiennent. La lunette de Galilée, les télescopes de Hubble, de Humason, ...le cyclotron ou le LHC contribuent à élargir notre champ de phénomènes et en rend possible leur unification par l'unité de leur type de vision ou d'approche de la nature. Il y a ici tout un champ nouveau à explorer qui serait de penser l'unification des connaissances non pas à partir des formalismes, mais à partir des instruments (qui « incarnent » des théories et les suscitent). (Soutif s.d)

Après cette présentation générale sur le fonctionnement théorico-expérimental des sciences empirico-formelles, nous allons présenter deux de ses disciplines : la physique et la biologie en montrant leur particularité.

Conclusion de la partie I.

La diversité de systèmes de sciences et d'objets élémentaires **est-elle résorbable dans une théorie générale des systèmes ?**

La distinction entre les sciences formelles et les sciences empirico-formelles repose sur la différence de méthode de justification : déduction et vérification expérimentale reposant sur la mathématisation et la mesure. Dans cette première partie, nous avons montré la diversité des connaissances, formelles ou empiriques et des méthodes de justification de ces connaissances, déductive ou hypothético-déductive.

Le premier système, formel, est rapporté par Jean Ladrière à l'idée d'une « forme de discours ». Un discours est un système quand il forme « un tout articulé dans lequel chaque proposition a une relation déterminée avec chacune des autres qu'elle en découle ou qu'elle soit présupposée par elle. » (Ladrière s.d). Un discours possède donc une cohérence, une logique, et s'exprime avant tout par un langage. Il s'agit donc d'un système symbolique dont la représentation est figurative. Au contraire, le second système, référant à des observables, traite d'un ordre de phénomènes, de processus, qui se manifeste dans le réel. D'une part, il est décrit en rapport à une grandeur, qui est mesurable ou calculable. Les mathématiques décrivent donc ici une altérité qui n'est plus seulement formelle. D'autre part, la question se pose sur la possibilité, ou non, d'articuler cette diversité de systèmes de descriptions.

Jean Ladrière pense que la science appartient elle-même à un système et la notion de système a été décrite dans la théorie du même nom. A ce propos, dans la préface du livre de Ludwig von Bertalanffy sur la théorie générale des systèmes, il est précisé que ce terme est utilisé au « sens large ». Il s'agit donc davantage d'une représentation comme celle formulée à travers la théorie de l'évolution, qui ne renvoie pas à une équation, mais contient « presque tout, de la recherche des fossiles, à l'anatomie et à la théorie mathématique de la sélection, à la « théorie du comportement » qui va de l'observation des oiseaux à des théories neurophysiologiques très compliquées ». (von Bertalanffy 2002).

De plus, cette théorie répond à un besoin d'organisation conceptuelle face à la diversité et à l'accroissement des connaissances sur la complexité du réel. Comme le précise également Ervin Laszlo dans sa préface, il s'agit d'une « approche non-réductionniste et non-mécaniste des systèmes, non seulement dans les phénomènes de la vie, mais également pour divers problèmes de la pensée de l'évolution, de la société et de l'histoire ». Dans ce sens, la théorie des systèmes s'apparenterait plus à une philosophie inclusive de la connaissance scientifique qu'à une théorie

scientifique, dans le sens où elle ne relève pas d'une formulation mathématique. Plus précisément, cette théorie s'articule autour de la « science des sciences », de la théorie des systèmes relative aux diverses sciences et des « ensembles de principes s'appliquant à tous les systèmes. »

La question qui se pose ici à partir des analyses de Jean Ladrière est de savoir si nous pourrions ultimement résorber la diversité des sciences empirico-formelles, de leurs objets, de leurs méthodes, dans une théorie générale des systèmes. Le fondateur de cette théorie, Ludwig Van Bertalanffy a livré des réflexions intéressantes à ce sujet. Pour lui, « nous pouvons fonder notre conception unitaire du monde, non pas sur l'espoir peut-être futile et certainement outré de réduire en dernier ressort tous les niveaux de la réalité à celui de la physique, mais plutôt sur « les isomorphismes qui existent entre les différents domaines » (von Bertalanffy 2002). Puisque nous avons vu qu'il était impossible de constituer ultimement une TVU, et que les descriptions de la nature révèlent, si on suit les philosophes du groupe de renormalisation, une structure en niveaux stratifiées et relativement autonomes. (« Le monde est, selon Aldous Huxley, une tranche napolitaine où les niveaux, les univers physique, biologique, social et moral représentent les couches de chocolat, de fraise et de vanille. Nous ne pouvons réduire la fraise en chocolat. ») (von Bertalanffy 2002). Nous pouvons peut-être chercher à unifier les disciplines en recherchant dans chacune et dans leurs strates ontologiques s'il existe des formes d'organisation similaires (isomorphes). Ce qui est important pour nous ici, c'est de remarquer qu'une unification des savoirs serait pensable, mais pas sous la forme de la construction d'une théorie unique résorbant toutes différences dans un formalisme unique, mais sous la forme de la mise en évidence d'un système de relations connectant des formes d'ordre, d'organisation, de structures similaires (isomorphes).

Dans la partie suivante, nous proposons d'étudier deux systèmes : le système physique et le système biologique. Ces deux disciplines font parties des sciences empirico-formelles, mais elles décrivent des objets aux combinatoires différentes. D'un point de vue observationnel, les sciences empirico-formelles recourent à l'analyse et à la quantification. Or, les objets élémentaires sont différents selon les disciplines : les particules ou les champs (nous n'identifions pas la « particule » à son acception classique) en physique, les cellules (ou autres machines moléculaires) en biologie. Chaque discipline décrit ensuite l'agencement de ces objets élémentaires et leurs variations qui peuvent être observées.

A présent, nous allons donc décrire la spécificité de ces deux disciplines en fonction de leurs objets élémentaires et de leurs combinatoires décrites par les lois physiques et les modèles

phylogénétiques. Puis, nous ouvrirons notre réflexion sur l'interdisciplinarité. Ainsi, notre réflexion nous a conduit de la mise en évidence des divers critères de scientificité (qui permettent d'attester de la valeur des preuves fondant la charge de vérité des énoncés) à la notion de systèmes d'objets propres aux disciplines empirico-formels (dont l'existence est établie en se fondant sur les critères de scientificité. L'irréductible diversité des critères de scientificité se double d'une variété de systèmes d'objets élémentaires et de descriptions de niveaux stratifiés. Nous allons explorer la physique et la biologie pour continuer à identifier des arguments qui empêcheraient la réduction de l'une à l'autre, laissant ouverte cette possibilité par Von Bertalanffy de penser l'unification sur la base d'un système d'isomorphismes.

PARTIE II.

UNE DIVERSITE DE PROCESSUS NATURELS : **LES SCIENCES EMPIRICO-FORMELLES ET LES SCIENCES HUMAINES**

Introduction de la partie II.

L'objet de recherche en fonction d'une élémentarité et la diversité de structures.

L'objectif de cette seconde partie est de décrire la diversité disciplinaire des sciences empirico-formelles et sur quoi se fonde les unités disciplinaires de la physique et de la biologie : des objets de recherche particuliers et des combinatoires propres en fonction d'un « type d'élémentarité », c'est-à-dire d'une forme d'entités élémentaires servant à reconstituer des systèmes et modes d'organisation de chaque discipline.

Les objets de recherche sont différents : en physique, les lois de l'univers matériel et, en biologie, les formes de vie. Or, cette différence des objets de recherche correspond à une diversité observable dans le réel. Les objets élémentaires décrits par la physique sont la particule et les champs, alors que l'objet élémentaire à partir duquel se manifeste les processus du vivant est la cellule. La diversité est donc, d'une part, celle de l'objet élémentaire, d'autre part, celle des processus qui impliquent ces objets. La nature d'un processus est décrite par une dynamique et une combinatoire d'un ensemble d'objets élémentaires. Il s'agit donc d'identifier les types de composants élémentaires et leur processus, au sein des disciplines et de montrer qu'ils ne peuvent pas se laisser réduire complètement et dans tous les cas les uns aux autres.

Les types de composants en physique sont les particules et leurs champs décrits par le modèle standard de la physique des particules. Il y a quatre types de particules dites élémentaires. Ensuite, la physique décrit des régularités phénoménales qui se manifestent quelle que soit l'échelle d'observation par des lois et le lien entre les lois par des formalismes mathématiques faisant intervenir des concepts fondamentaux d'espace, temps, énergie, masse, charge, ... qui

peuvent être liés ou non suivant les domaines (en relativité l'espace et le temps sont unifiés dans l'espace-temps, ainsi que l'énergie et la masse.) La physique des particules, tout comme l'astrophysique, se construisent par l'alternance entre formalisation et observations manifestant une part égale entre la nécessité de mobiliser les phénomènes et d'intégrer les éléments apportés par la mesure. Ces domaines progressent donc aussi avec l'amélioration des techniques et l'usage d'outils mathématiques appropriés pour conceptualiser les relations entre ces constituants de la matière, de son échelle la plus infime à son échelle la plus globale.

Cependant, nous verrons que la combinatoire décrite par la physique ne suffit pas à décrire tous les types de processus dans le réel. En effet, les objets spécifiques de la biologie ne se comportent pas du tout comme ceux de la physique fondamentale. La biologie apporte donc des connaissances irréductibles à celles de la physique par sa description des objets élémentaires spécifiques à la vie et à leurs processus singuliers : les types de cellule et les fonctions émergentes. Certes, la vie se constitue à partir de composants matériels, mais ce qui la caractérise en propre, à partir de la cellule et des diverses fonctions que le vivant peut remplir, ce sont des comportements qui émergent à un certain degré de complexité (liés comme nous l'avons vu à des relations entre constituants élémentaires) et dont la description résiste nous le verrons à une réduction pure et simple à des lois de la physique fondamentale. L'impossibilité de réduction se manifeste aussi lorsqu'on tente de décrire les fonctions cognitives de haut-niveau.

Dans un troisième chapitre, nous nommerons donc ce qu'apporte la neurochimie, mais aussi d'autres disciplines regroupées au sein du domaine des neurosciences cognitives. Cette diversité de combinatoires décrite par une diversité de branches et de disciplines, celles des lois physiques, des filiations génétiques des formes de vie, des relations métaboliques dans un organisme, des connexions neurales et neuronales, montre qu'il existe une diversité de manières de décrire le réel, en fonction d'observables et de méthodes descriptives et explicatives différents. Toutefois, ces descriptions mettent en évidence certaines caractéristiques communes, comme la présence d'invariants.

L'omniprésence des invariants et des structures qui les révèlent est la base de la reconnaissance des éléments de réalité car il n'est pas de réalité appréhendable qui ne présente un type d'invariance à un certain niveau. Cependant, le type d'invariants et de structures est très différent, par exemple, en physique et en biologie. Ainsi, ces deux disciplines sont nécessaires, mais elles pourraient bien se révéler irréductibles l'une à l'autre du point de vue des types d'invariants et des structures qui les mettent en évidence.

Trois points mériteraient d'être signalés, qui sont liés au fait que la nature décrite par les sciences ne peut être considérée comme déployée seulement à un seul niveau, c'est la question de la stratification en échelles qu'il nous faut épingle.

- (1) Le premier problème est celui de la diversité d'échelles dans le réel et leur articulation. Nous verrons comment la physique répond sur ce point par des lois générales.
- (2) Le second problème est celui de la coexistence d'une pluralité à la même échelle. Si on considère l'échelle macroscopique où apparaît le vivant, on constate que celui-ci est lui-même un phénomène multi-échelle.

A chaque niveau, on doit étudier des comportements émergents qui possèdent leurs lois propres (leur « auto-momie »). On peut à raison dire que le biologique repose sur des niveaux physico-chimiques. Mais, on doit aussi s'interroger sur la capacité de la physique à appréhender correctement la description de ce qui caractérise le vivant. On peut bien entendu tenter de nier la particularité du vivant, c'est le cas précisément de l'hypothèse philosophique réductionniste. Mais une chose est de formuler l'hypothèse, autre chose est de la mettre en œuvre et d'en montrer la fécondité dans toutes les situations.

De plus, la biologie décrit parfaitement les bases physico-chimiques du vivant mais ce vivant s'épuise-t-il totalement dans ces bases ? Il faut donc trouver l'unité essentielle du vivant. Il faut exprimer en quoi le vivant est singulier et ce qui le caractérise en propre. Par exemple, le vivant possède une différence de compositions par rapport au minéral, aux roches, aux métaux, dont sont formés les sols des planètes, qui peuvent être étudiés par la chimie, la géologie. Le vivant est en partie constitué de minéraux, mais le vivant est un mode d'organisation spécifique de la matière. Ainsi, il existe une différence structurelle.

La nature du vivant est cellulaire, ce qui n'est pas le cas de la nature du « minéral ». Or, toutes ces différences peuvent être envisagées du point de vue de la science. La différence du mode d'organisation du vivant a été imagée par Henri Atlan décrivant les systèmes biologiques comme des réalités situées entre « le cristal et la fumée » (Atlan 1979.)

- (3) Enfin, le troisième point concerne les limites du discours rationnel dans le saisissement de l'ensemble de la réalité. Il reste encore une question plus radicale. Même si l'on parvient à montrer une ontologie « pluraliste », c'est-à-dire faisant intervenir plusieurs niveaux de

réalité irréductibles les uns aux autres, il n'en resterait pas moins vrai, qu'il faudrait encore fonder ce qui permet la position et l'analyse de cette ontologie : la rationalité.

La pensée rationnelle donne en effet sens aux représentations de la science : elle fonde ses concepts et ses raisonnements, mais qui donne sens à la pensée, qui est ce qui ultimement la fonde ? Nous évoquerons dans la dernière partie cette profonde question dont la nature est philosophique.

CHAPITRE 1.

Les sciences de l'univers par l'unification de la physique.

Introduction.

Que signifie une unification de la physique et...par la physique ?

Il est indéniable que la physique contemporaine se caractérise par un projet d'unification croissante de ses représentations du monde, une méta-représentation, projet motivé par la réussite effective de certaines unifications de formalismes dans des secteurs importants : la physique des interactions fondamentales, la physique du cosmos à grande échelle, la physique des systèmes complexes (Barrau 1991). L'objectif de ce chapitre est de parcourir rapidement ces domaines, non pas pour les décrire ne fût-ce que succinctement, ce serait impensable dans le cadre du présent travail, mais pour cerner en quoi consiste l'unification et se poser la question de savoir si elle est susceptible d'aboutir ultimement et complètement.

Avant toute chose, il est important de s'interroger sur la signification de la notion même d'unification de la physique. Il y a une forme d'unité des descriptions de la physique, qui peut être considérée comme acquise, même si elle reste à fonder : le fait que toutes ces descriptions s'expriment dans le langage mathématique (Leblond 1982). Le problème de la nature efficace des descriptions mathématiques en physique est un problème ancien que l'on pourrait, en faisant court, ramener à la considération suivante : les mathématiques constituent une manière symbolique de représenter des relations très générales entre des objets (grandeurs, observables,

...). De plus, ces relations peuvent exprimer des transformations (qui relient précisément divers objets) qui préservent certains invariants. Or, la donnée, ou la perception, ou encore la description d'un élément de réalité nécessite la donnée d'au moins un invariant (pensons aux objets usuels, ils nous apparaissent comme des réalités et non des illusions en raison du fait qu'ils restent invariants lors du changement de point de vue). Ceci explique que les mathématiques, (du moins celles qui exhibent une richesse en invariants !) sont aptes à décrire des réalités, mais dans la mesure où l'on a pu mettre le doigt sur des invariants dans le domaine empirique considéré. Ce qui n'aurait purement et simplement aucune invariance, sous aucun point de vue, ne pourrait pas faire l'objet d'une mathématisation efficace. Pensons simplement au comportement purement singulier et contingent d'un acteur économique individuel ou encore à l'impossibilité de disposer d'une théorie mathématique de l'histoire, formée d'événements purement singuliers...

Cependant, le problème qui nous occupe ici n'est pas celui de la mathématisabilité de la physique et de son efficacité. Notre problème est celui de l'unification. Or, on pourrait avoir des théories mathématiques de la physique décrivant adéquatement (c'est-à-dire expliquant une série de prédictions expérimentales ou observationnelles), toute une série de domaines de phénomènes, sans pour autant que ces théories puissent être unifiées en un et un seul formalisme unitaire. Donc, ce qui nous occupe c'est, non pas le fait que toute la physique puisse être exprimée un et un seul langage : le langage des mathématiques (la question rebondirait d'ailleurs : celui-ci est-il unifié ou non et pourquoi ?), mais bien plutôt le fait de savoir si les cadres théoriques des domaines variés de la physique peuvent être dérivés (logiquement) d'un et seul cadre théorique, mathématique. En effet, deux théories, toutes deux proprement « mathématiques », peuvent exprimer des contenus physiques différents voire contradictoires. L'idée de l'unification de la physique serait de remonter à une théorie unique susceptible par des opérations logiques de redonner celles qui décrivent des domaines régionaux de phénomènes.

Parmi ces opérations, on pourrait avoir des opérations de déductions (particularisation du cadre général aux cadres particuliers). Un exemple serait celui de la déduction des équations décrivant le système Terre-Lune à partir de la mécanique classique ou encore la déduction des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène à partir de l'équation de Schrödinger (en particulierisant la forme du potentiel), elle-même provenant du cadre général de la mécanique quantique. Si on considère des tentatives assez anciennes d'unification de l'électromagnétisme de Maxwell et de la gravitation d'Einstein, on peut voir à l'œuvre ce genre de déduction à partir d'un cadre général. On considère à la suite de Kaluza et Klein une dimension supplémentaire s'ajoutant à

celles d'espace-temps. Puis, on écrit une équation générale (à partir des mêmes principes qui conduisent à écrire les équations d'Einstein de la relativité générale). On s'aperçoit alors que de nouvelles équations apparaissent, en plus de celle de la relativité générale, qui s'interprètent comme étant celles de Maxwell. Ici, l'unification des théories se fait au moyen d'un cadre général que l'on particularise.

Mais on pourrait aussi considérer des opérations d'approximations. Un cadre particulier est obtenu à partir du cadre général en opérant des approximations de certaines fonctions ou encore des opérations de déformation. Un bel exemple est donné par l'approximation classique de la relativité générale (qui pour des champs gravitationnels faibles et pour une vitesse de la lumière tendant vers l'infini) redonne la mécanique classique. On peut obtenir également des grandeurs thermodynamiques comme la pression ou la température, à partir de la mécanique statistique, en considérant une approximation caractérisée par un passage à l'infini du nombre de particules.

Ce genre de procédure permet d'unifier des approches probabilistes et des approches déterministes qui sembleraient irréconciliables à première vue. Ainsi, par exemple, le passage de la dynamique purement stochastique d'une particule individuelle à un gaz de telles particules peut, par le théorème central limite, déboucher sur un comportement globalement déterministe. Il en va de même, par analogie, avec le lancer d'une pièce, non truquée, qui est purement aléatoire et qui donne, si l'on prend un grand nombre de lancers, des résultats parfaitement déterministes. Par exemple, avec certitude, je peux dire que sur 500 lancers, il sortira au moins une fois le côté face de la pièce.

Un autre type d'opération serait celui de la déformation de structure. Par exemple, on a beaucoup insisté sur l'incommensurabilité de la mécanique classique et de la mécanique quantique. Mais, on peut montrer qu'il existe un lien théorique profond entre ces deux théories. La mécanique classique dans sa formulation hamiltonienne présente des propriétés de symétrie particulière (symétrie sous le groupe dit symplectique). On montre que si l'on « déforme » la mécanique classique en y introduisant à la place des fonctions, des positions et des quantités de mouvement des opérateurs non-commutatifs, c'est cela la « quantification », on obtient la mécanique quantique.

Bien entendu il s'agit d'un autre cadre théorique, mais dont on peut dire qu'il n'est pas disconnecté totalement de celui de la mécanique classique, puisqu'il y est relié à l'aide d'une déformation (introduisant un paramètre de déformation qui n'est autre que la constante de Planck). Il est remarquable de noter à cet effet, que dans la procédure de quantification dite de

Weyl-Wigner (approche « espace de phase » de la quantification), on peut obtenir une grandeur qui mime une fonction de densité sur l'espace de phase : la fonction de Wigner, qui présente des propriétés d'invariance sous le groupe symplectique. (de Gosson 2017).

Ceci illustre parfaitement l'idée d'une unification de cadre par « déformation » d'un cadre théorique en un autre, avec la préservation de certaines structures communes. L'unification de la physique doit ici s'entendre comme la mise en évidence d'opérations assez générales, qui appliquent (transforment), un cadre théorique ou un autre à l'aide de transformations présentant des propriétés particulières. Il peut s'agir d'inférence logique : particularisation (déduction du général au particulier), de transformations algébriques ou géométriques (comme celle des groupes discrets ou des groupes de Lie : dont un exemple est le groupe symplectique) ou des déformations de structures, voire encore de transformations topologiques qui sont des types de déformations « continues ».

Nous sommes donc déjà confrontés à deux types de compréhension de la notion d'unification de la physique : soit la référence à un langage unique (celui des mathématiques) exprimant tous les contenus des descriptions physiques, soit la référence à des procédures qui permettent de relier les cadres théoriques différents par des opérations de transformations bien identifiées. Toutefois, cela n'épuise nullement la signification du concept d'unification. En fait, il s'agit ici d'une unification pensée comme détermination d'une médiation entre des cadres universels, généraux, par exemple, des lois, des structures générales sous-tendant des théories, des équations, ...

Cependant, comme Wigner l'avait fait remarquer, il existe en physique une dualité qui semble irréductible et sur laquelle nous allons revenir dans la suite. On peut très bien avoir des équations générales, par exemple les équations de Newton, mais qui restent inutilisables sans la fixation de conditions initiales (dans ce cas la position et la vitesse initiales d'une particule par exemple). Ce sont ces conditions qui vont permettre de pointer une solution (une « trajectoire ») dans l'ensemble de toutes les solutions possibles.

Prenons un autre exemple : l'équation de la chaleur. Pour pouvoir la résoudre, il faut préciser les conditions initiales, mais aussi les conditions aux limites (déterminant les caractéristiques géométriques du corps dans lequel on étudie les variations temporelles et spatiales de la chaleur. Conditions aux limites ou conditions initiales sont liées aux contingences du système étudié et ne peuvent pas être déduites des équations générales. Je décide d'étudier la propagation de la chaleur dans une barre cylindrique, ou dans un disque d'une certaine épaisseur, c'est un choix

contingent lié à la situation que je considère et rien dans les équations générales ne pourrait me donner des renseignements sur la situation particulière que je décide d'étudier !

Ces conditions peuvent être affectées d'une incertitude intrinsèque à la nature ou liée à notre ignorance ou aux imprécisions de l'observations ou des instruments. Il peut se faire aussi que les équations étant connues une erreur minime sur ces conditions entraîne une impossibilité de fixer la solution à long terme, comme pour les systèmes chaotiques par exemple, c'est le cas pour les équations de l'écoulement des fluides de Navier-Stokes qui sont parfaitement connues et qui s'appliquent à la prévision météorologique... avec le succès à long terme que l'on connaît.

Si l'on peut assez facilement penser que l'unification des cadres physiques universels (loi, équations, théories, ...) pourra se réaliser de mieux en mieux, on peut douter que l'unification entre les lois et les conditions initiales ou aux frontières se réalisent. Certains grands physiciens ont pensé (philosophiquement, car rien dans la science ne permet d'avancer cela !) que cette unification ne pourrait se faire, une dualité entre l'universel et le particulier, entre le nécessaire et le contingent, restant irréductible. Mais, philosophiquement, et même techniquement (en restant dans les formalismes) pourrait-on absorber les conditions initiales dans les lois générales ?

Ce problème déjà rencontré par Einstein et qu'il qualifiait de « surcausalité » (Überkausalität) est conceptuellement problématique. On peut envisager d'écrire tellement d'équations fondamentales que, pour qu'elles soient cohérentes entre elles, les paramètres qu'elles renferment se fixent automatiquement. Cela rappelle un problème d'algèbre élémentaire : si, dans un système d'équations à plusieurs inconnues, nous avons plus d'équations que d'inconnues, alors les coefficients intervenant dans les équations doivent avoir des valeurs bien particulières pour avoir la chance d'obtenir une solution. Mais dans ce cas, on devrait expliquer pourquoi on choisit ces équations fondamentales et pas d'autres. On serait ramené à des arguments qui ne pourraient être entièrement fondés sur les équations fondamentales.

Il reste encore un problème. Les lois et les équations comportent des paramètres qui en général sont fixés par des expériences ou des observations. On peut penser, par exemple, à la valeur de la constante de gravitation G dans la loi de Newton ou la permittivité électrique du vide dans la loi de Coulomb. On pourrait dire qu'il existe ici une nouvelle dualité, qui brise l'unité fondamentale : il y a des variables (des masses, des charges,) et il y a des paramètres (G , ...). En fait, ces paramètres déterminent des lois particulières, par exemple, la forme de la loi de la

gravitation de Newton et celle de Coulomb ont une même forme ($F = C \frac{QQ'}{r^2}$). Pour obtenir l'une ou l'autre de ces lois, il faut non seulement changer les masses en charges électriques mais aussi spécifier la constante C (qui elle est déterminée expérimentalement). Les différentes constantes signifient l'existence d'interactions différentes avec des intensités différentes.

On peut imaginer une unification de ces constantes sur le fond d'une unification des interactions fondamentales. On pourrait alors remonter à un formalisme unitaire qui dérive l'apparition de ces interactions et la valeur de ces constantes. Nous y reviendrons. Mais, ultimement, pourrait-on une fois que l'on atteint cette théorie unitaire demander à la théorie d'expliquer tous les paramètres qu'elle contient ? Ou doit-on se contenter d'une irréductible dualité : « il y a des variables et il y a des paramètres dans les lois et équations générales » manifestant la présence d'un contingent non-résorbable dans du nécessaire ? La question mène à d'étranges obstacles : la théorie censée dériver la valeur des paramètres devrait elle-même auto justifier celle des paramètres qu'elle contient. Mais cela est-il ultimement possible ? Logiquement cohérent ? Ces questions méritent d'être soulevées à défaut d'être résolues !

1. Une unité souvent brisée : physique des interactions fondamentales.

Une symétrie est une transformation qui conserve un certain nombre d'invariants qui caractérise une configuration d'objets. Une rotation du plan usuel est une symétrie qui conserve les distances et donc la forme des cercles (et donc leur rayon), des triangles, ... Si nous considérons, dans l'espace à trois dimensions, une projection à partir d'un centre sur un plan (pensons aux rayons de lumière d'une lampe qui projettent des ombres sur un mur d'une pièce), nous constatons que celle-ci ne conserve pas les distances, mais elle conserve le milieu d'un segment. Elles ne conservent pas non plus les formes des cercles qui peuvent devenir des ellipses ou des hyperboles (Pensons toujours aux ombres projetées par l'abat-jour d'une lampe !)

En fait, on voit que la symétrie est une transformation qui conserve des invariants, en même temps, qu'elle caractérise des configurations caractéristiques d'une géométrie. Les rotations donnent un sens au cercle, mais une symétrie de l'espace ordinaire qui ne conserve que les angles et pas les distances ne fera pas de distinction entre un cercle et une droite (si on augmente le rayon d'un cercle à l'infini, ce que l'on peut faire puisqu'ici les distances ne sont pas invariantes, on obtient une droite ! Donc, la différence entre un cercle et une droite ne prend sens que par rapport à une symétrie caractéristique. Nous avons ici l'essence de ce qu'on a

appelé, après Felix Klein, le « Programme d'Erlangen ». ¹⁹ Une géométrie et ses figures caractéristiques sont déterminées par la donnée d'un groupe : groupe d'isométrie en géométrie euclidienne, groupe projectif en géométrie projective, groupe symplectique en géométrie symplectique, groupe conforme en géométrie conforme... Les symétries peuvent être discrètes (par exemple le groupe des réflexions par rapport à un plan ou le groupe des transformations qui laissent invariants des polygones réguliers) ou continues (par exemple les groupes de Lie : groupes de transformations qui dépendent de paramètres continus comme le groupe de rotations en deux dimensions, qui est un groupe à un paramètre continu : l'angle des rotations).

Emmy Noether, la célèbre collaboratrice de David Hilbert à Göttingen a produit un beau théorème en 1918 dont la portée en physique n'a cessé de se vérifier. ²⁰ Le théorème de Noether dit en gros que si les grandeurs de la physique restent invariantes sous des transformations d'un groupe de transformations dépendant de paramètres continus (ce que l'on appelle un groupe de Lie, du nom du mathématicien Sophus Lie), alors il existe toujours un certain nombre d'invariants correspondant aux générateurs de ce groupe. Ainsi, si une description physique reste la même sous les transformations suivantes : translations dans le temps, dans l'espace ou rotations respectivement, alors le système physique considéré possède directement des invariants caractéristiques qui sont l'énergie, la quantité de mouvement et la quantité de moment angulaire, respectivement. Cela signifie qu'à la question de savoir pourquoi l'énergie se conserve ? On répondra immédiatement : « parce que la physique est invariante sous les translations dans le temps », c'est-à-dire parce que la description des lois physiques ne change pas avec le temps.

Le théorème de Noether a ceci d'important qu'il montre que des questions, des « pourquoi ? » qui semblaient ne pas avoir de réponse en physique peuvent très bien y trouver des réponses satisfaisantes. On s'est longtemps contenté de dire que si des grandeurs se conservaient c'était le fait de contingences : la nature est comme cela... L'énergie ne se perd pas, elle se conserve ! Mais en fait, maintenant, on sait que la conservation des grandeurs est liée à des symétries *globales* de l'espace-temps. Un monde qui n'aurait pas de symétrie globale ou pas de symétrie du tout n'aurait pas de grandeurs conservées et les mesures y seraient d'ailleurs impossibles ! Car la possibilité d'effectuer certaines mesures nécessite l'existence de grandeurs qui ne varient pas.

¹⁹ Cf. L. Boi, *Le problème mathématique de l'espace. Une quête de l'intelligible*, Berlin, Springer, 1995.

²⁰ Cf. J-L Féménias, *Introduction au calcul variationnel en physique. Aperçu historique et application*, Paris, Ellipse, pp.173-183

Nous avons parlé de symétrie globale (c'est-à-dire qui ne dépendent pas de l'endroit où l'on se trouve). Mais on pourrait s'intéresser à des symétries locales, des transformations qui sont définies en chaque point en particulier et qui dépendent du point en question. Un des apports importants de la physique contemporaine est d'avoir montré que l'existence de symétries locales particulières en chaque point de l'espace-temps est liée à l'existence d'interactions physiques particulières. C'est l'essence de ce que l'on appelle aujourd'hui les « théories de jauge ».

Les symétries de jauge dont nous parlons ici sont des symétries « locales » (des symétries dont les paramètres varient en fonction de l'endroit où l'on se trouve). Imposer une symétrie locale n'est pas évident. Prenons un exemple, un ballon sphérique a une symétrie « globale » sous des rotations. Si on fait tourner le ballon, il reste identique à lui-même. Mais imaginons que nous maintenions le ballon fixe et que nous imposions qu'en un point de sa surface il existe une symétrie locale sous rotation. Il faudrait que le ballon reste le même alors qu'on impose cette rotation locale. Mais cela n'est pas possible car la rotation imposerait une déformation du ballon puisque les autres points restent fixes. Pour que cela soit possible, il faudrait découper une calotte sphérique et lui permettre de tourner... Ce découpage nécessite des forces qui neutralisent celles qui font tenir la calotte. L'apparition de ces forces est l'analogue de l'émergence d'une interaction particulière liée à l'existence d'une symétrie locale. Il se fait que l'on peut démontrer que les interactions électromagnétique, forte et faible, sont liées à l'existence de symétries locales (de jauge). (Guidry 1999).

De manière plus précise, ces symétries sont liées à des groupes de Lie appelés $U(1)$, $SU(2)$ et $SU(3)$.²¹ Le premier groupe, de dimension 1 est isomorphe aux rotations dans le plan à deux dimensions. Le deuxième, de dimension 3 est isomorphe (à un double recouvrement près) aux rotations de l'espace à trois dimensions. Le troisième est un groupe de dimension 8. La dimension des groupes correspond au nombre de ses générateurs (éléments qui servent, par multiplication, à engendrer tout le groupe). On peut montrer qu'à chaque générateur est associé un « messenger » caractéristique de l'interaction en question : 1 photon dans le cas de l'électromagnétisme et du groupe $U(1)$, trois bosons vectoriels intermédiaires ($W^\pm, Z^0$), dans le cas de l'interaction faible et du groupe $SU(2)$ et huit gluons dans le cadre de l'interaction forte et du groupe $SU(3)$. Les interactions et leur messagers (les « particules » qui forment le champ d'interaction) s'expliquent donc par le fait qu'aux symétries globales de l'espace-temps

²¹ Cf. R.Gilmore, *Lie Groups, Lie Algebras and some of their applications*, Wiley, 1974. A.Zee, *Vertigineuses symétries*, Paris, EDP Sciences, 2018.

(qui expliquent la conservation de grandeurs dont nous avons parlé) s'ajoutent des symétries locales de jauge.

Les symétries de jauge offrent donc un moyen d'unifier les diverses interactions et d'en justifier l'existence. Maintenant, il faudrait encore expliquer pourquoi ces groupes sont ceux qui décrivent la nature telle qu'elle est. Pourquoi ces symétries-là et pas d'autres ? La théorie de jauge explique l'existence des interactions une fois la symétrie de jauge posée ou supposée, mais elle ne justifie pas a priori pourquoi cette symétrie est bien celle-là. Est-ce une contingence ? Ou le produit d'une nécessité plus profonde ? Ici, l'unification semble toucher de nouveau une limite.

Il est intéressant de noter que, dans les gammes d'énergie qui sont celles des premiers moments de l'univers, les caractéristiques des trois interactions, dont nous venons de parler, se confondent. Une unification se produit en remontant dans le temps ! Mais alors, l'émergence des diverses interactions en fonction du temps apparaît comme une sorte de phylogenèse où des bifurcations apparaissent donnant naissance aux diverses « branches » que constituent les interactions. Quelque chose comme une genèse, une « phylogenèse » des interactions devient pensable, mais avec en corrélat l'idée d'une sorte de contingence de l'histoire des interactions... L'unité initiale se brise donnant naissance aux interactions que nous connaissons aujourd'hui ? Remarquons que nous n'avons pas parlé de l'interaction gravitationnelle... Mais on pourrait penser à cette interaction de la même manière, en faisant intervenir des symétries locales²² et un messenger : le graviton...

L'unification en physique peut trouver une réalisation dans le choix d'un unique groupe de symétrie qui inclurait tous les groupes associés à des interactions connues. Mais la question rebondirait : pourquoi se contenter du groupe redonnant ceux qui décrivent les interactions connues ? N'y-a-t-il pas d'autres interactions inconnues, ou qui ne s'expriment pas, ou plus maintenant ? Comment justifier a priori le choix de ce groupe ? On pourrait penser à des arguments mathématiques liés à des propriétés spéciales que certains groupes, ou même un seul, possèderaient. Mais un argument mathématique n'est pas suffisant. Certaines belles structures mathématiques pourraient très bien ne pas trouver de corrélat empirique ! Des arguments épistémologiques sur lesquels nous allons insister un peu plus pourraient être invoqués dans lesquels les propriétés recherchées seraient liées à la possibilité de décrire et de connaître des éléments de réalité.

²² Les symétries traduiraient les transformations générales de coordonnées exigées par la covariance des équations de la relativité générale.

Remarquons que les symétries ne sont pas nécessairement associées à des groupes. Si nous considérons des évolutions irréversibles comme celles décrites par l'équation de la chaleur, par exemple, nous pouvons avoir des transformations qui conservent certains invariants tout en n'étant pas réversibles. Un ensemble de transformations qui dispose d'un élément neutre, qui sont associatives, mais qui ne possèdent pas nécessairement de transformation inverses (qui composée avec la transformation initiale redonne le neutre) forme ce que l'on appelle un tel semi-groupe (ou un monoïde). Ce genre de « structure » (ensemble doté d'une opération douée de certaines propriétés) peut servir à décrire des évolutions irréversibles (l'écoulement du temps est décrit par un semi-groupe à un paramètre par exemple).

L'idée de symétrie est très ancienne. L'adjectif « *symmetros* » est utilisé par Platon dans le *Timée* lorsqu'il explique comment le Démonstrateur construit à partir de la « *khôra* » (espace-matière) les polyèdres réguliers servant à définir les 4 éléments et la forme globale du Cosmos. Cet adjectif signifie précisément ce qui a « même mesure » : cette mesure se conserve alors qu'une opération transforme les configurations. Platon associe d'ailleurs « *symmetria* » et « *analogia* ». Ce dernier terme désigne ce qui est caractéristique du « logos », c'est-à-dire du rapport de nombre naturels. Celui-ci définit de fait une symétrie car vous pouvez transformer ce rapport en multipliant le numérateur et le dénominateur par le même facteur sans changer la « mesure », à savoir ici le résultat de la fraction, qui apparaît donc comme l'invariant de la symétrie en question. (Platon 1992)

La symétrie est une opération non seulement intéressante, mathématiquement, mais aussi épistémologiquement. En effet, lorsqu'on décrit le réel, on doit nécessairement donner des invariants sous certaines transformations. On ne parlerait pas de réalité si, lorsqu'on change de place celle-ci disparaissait purement et simplement. Lorsqu'on change l'orientation de son regard et que l'on constate que le quai de la gare est au repos par rapport à nous, on en déduit que le mouvement de notre train placé à côté d'un autre qui partait, n'était qu'une illusion. Le réel se donne comme quelque chose qui subsiste sous changement de point de vue. Husserl faisait remarquer d'ailleurs qu'une « objectivité » se donne comme invariant dans la synthèse de divers profils (*abschattungen*). On pourrait faire l'hypothèse que l'appréhension ou la représentation de ce que l'on pourrait appeler effectivement une « réalité » ne peut se réaliser que dans et par la donnée d'un ensemble d'invariants caractéristiques de transformations.

En géométrie projective le cercle n'a pas de réalité (car les transformations projectives ne conservent pas les cercles). De manière analogue, en relativité restreinte le champ magnétique

n'a pas de réalité, car le passage d'un référentiel à un autre, en mouvement rectiligne par rapport au premier, ne le conserve pas ! Prenons par exemple une charge électrique placée sur un wagon en mouvement rectiligne uniforme. Dans le wagon la charge est au repos, le champ magnétique qui lui serait associé n'existe pas. En revanche, par rapport au quai, le champ magnétique existe, car une charge en mouvement est un « courant » et ce courant engendre un champ. En fait, seul le champ électromagnétique et le tenseur antisymétrique qui le décrit possède un sens invariant et correspond à une véritable réalité au sens relativiste.

En physique, la mise en évidence et la reconnaissance de symétries fondamentales, ou non, ne suffit pas pour décrire la richesse des phénomènes, si l'on prend ne fût-ce qu'un problème macroscopique comme la congélation d'un liquide. Si l'on veut décrire précisément les détails des figures qui apparaissent sur les flaques d'eau gelées, on ne peut se contenter de faire appel aux symétries qui caractérisent l'eau, car les domaines qui y apparaissent après congélation brisent précisément la symétrie. Et cette brisure est liée à des facteurs microscopiques (poussières, ...) qui vont orienter, çà et là, la direction de la cristallisation. Mais les détails précis de ces facteurs ne peuvent être connus, même s'ils interviennent de manière cruciale dans le phénomène. Pour comprendre le phénomène, il faut nécessairement briser la symétrie (liée à l'homogénéité de la configuration liquide). Même si la brisure est bien comprise théoriquement et de manière générale, les détails des causes des brisures « contingentes » qui mènent à tels ou tels dessins de domaines sur les flaques d'eau n'est pas appréhendable (sauf statistiquement).

En physique fondamentale, la brisure des symétries est essentielle. En effet, les symétries de jauge, si elles sont parfaitement respectées impliqueraient que tous les « bosons de jauge », c'est-à-dire les messagers qui transportent une interaction, soient de masse nulle. Ceci signifierait aussi que toutes les interactions sont de portée infinie. Mais, ce n'est pas le cas pour toutes les interactions. Les interactions faible et forte sont confinées dans les limites du noyau, contrairement à l'interaction électromagnétique et gravitationnelle qui ont une portée infinie. Comment expliquer la masse de certains bosons de jauge ? Il est ici essentiel de briser la symétrie et ceci est lié à un champ : celui de Brout-Englert-Higgs par exemple ! Pour expliquer l'origine de la masse, il faut briser la symétrie.

Il existe un autre endroit où l'on rencontre une brisure de symétrie en physique : la violation de la symétrie CP. Expliquons-nous. Lorsqu'on met ensemble la relativité restreinte (pas générale !) et la mécanique quantique, on obtient une belle théorie cohérente appelée la théorie quantique et relativiste des champs. Lorsqu'on étudie celle-ci on se rend compte qu'elle

présente une symétrie appelée CPT. Ceci signifie que la physique reste invariante lorsqu'on change le signe des charges (C), lorsqu'on regarde le système dans un miroir (P) et lorsqu'on inverse le cours du temps (T).

Dans des expériences de désintégration, mettant en jeu l'interaction faible, on remarque que la symétrie CP est brisée. Autrement dit, si on renverse dans ces expériences le signe des charges et le sens des axes spatiaux, on se trouve dans une situation qui ne se présente jamais empiriquement. Ceci veut dire que la symétrie T est elle-même violée, (ce qui semble normal puisqu'on ne peut inverser le cours du temps) pour qu'au final la symétrie CPT soit respectée. Cette brisure de la symétrie CP est une donnée observée ! On peut en rechercher la raison fondamentale ou admettre que celle-ci est brisée de manière contingente. Ce qui nous importe ici ce n'est pas tant la réponse à cette question, mais c'est le fait que les données empiriques amènent quelque fois à obliger à briser une symétrie, qui théoriquement s'imposait avec d'ailleurs peut-être une force esthétique. Un exemple vient à l'esprit dans ce contexte. La symétrie brisée peut être celle de la forme des équations.

Un système d'équation :

$$\begin{cases} D(x) = f \\ D'(x) = 0 \end{cases}$$

Apparaît comme dissymétrique.

Le système suivant :

$$\begin{cases} D(x) = f \\ D'(x) = f' \end{cases}$$

est formellement plus symétrique.

On rencontre une telle situation dans les équations de Maxwell décrivant l'électromagnétisme. Une dissymétrie formelle apparaît liée au fait qu'il n'existe pas de monopôle magnétique. Deux attitudes sont possibles dans ce cas. L'une consisterait à dire que le formalisme mathématique suggère de rendre les équations symétriques en introduisant une densité de charge de monopôle magnétique.²³ C'est ce qu'a suggéré Dirac. Et on pourrait penser que, dans les premiers temps de l'univers, il y avait des monopôles qui ne sont pas observés aujourd'hui, parce que l'univers s'est dilaté par inflation, diluant très fort les monopôles produits au début de notre histoire.

²³ Ce serait l'analogue de l'introduction de f' dans le second système d'équations. Cf. P.Husset, « Le monopole magnétique », *La Recherche*, n°146, Juillet-août 1983, pp. 946-954.

Mais une autre attitude consisterait à dire qu'il n'y a pas de raison de rechercher à tout prix la symétrie et que la brisure formelle ici présente pourrait être une contingence empirique !

Une unification demande donc non seulement le rapport à des symétries, mais aussi à un processus de brisure (et son explication !), qui permet de penser le passage de l'universel au particulier. Ce qui est intéressant, philosophiquement, c'est que cette brisure correspond aussi à un processus historique. C'est au cours d'une cosmogénèse, d'une histoire de la nature, que la symétrie se brise... Mieux, c'est cette brisure qui construit en fait l'histoire. Mais le problème fondamental est alors qu'une compréhension totale de l'unité naturelle demanderait une pensée de toutes les contingences qui font cette histoire... On peut penser des théories générales des brisures de symétrie, mais peut-on penser l'émergence de telle brisure particulière qui a déterminé l'histoire de nos interactions... et ce qu'est la physique aujourd'hui ?

La physique est aussi une science historique. Bien entendu, on peut soutenir que si l'on remonte dans le passé, donc si on monte en énergie, toutes les interactions dégénèrent en une seule et, dès lors, que la symétrie n'est plus brisée et qu'elle permet une unification totale. Oui, mais en fait, il s'agit là d'une unification dans les premiers moments de l'univers et à haute énergie. Or, une unification complète nécessite la compréhension des détails actuels des interactions. Il nous faut unifier la physique des premiers moments de l'univers avec celle que nous connaissons aujourd'hui. Or, pour ce faire, il nous faut une compréhension unifiée de l'histoire... Cependant, il nous est difficile de produire cette théorie de l'histoire... même naturelle. Peut-être existe-t-elle ? Mais s'il existe une contingence radicale dans la réalité, il pourrait bien se faire que l'unification ne puisse pas se réaliser par principe...

Nous avons déjà évoqué la question des conditions initiales ou aux frontières. On pourrait dire que le choix de ces dernières vient briser l'universalité « homogène » de l'ensemble des solutions possibles d'une équation fondamentale d'évolution caractérisant un système physique, pour déterminer un choix particulier d'évolution. Nous verrons plus loin l'importance de la question des conditions initiales dans le cadre de la cosmologie. Ce qui est important pour notre propos, c'est chaque fois de s'interroger sur la possibilité ou non de résorber, dans un cadre général, la particularité de conditions sans lesquelles nous ne pouvons obtenir réellement d'explication ultime. Souvent ce fait est passé sous silence. Mais il est fondamental ! Il n'est pas d'explication totale et ultime sans prise en compte des raisons justifiant l'existence des contingences ! Mais toute la question est de savoir si cela est cohérent compte tenu du fait que cette explication est cherchée du côté des cadres universels et nécessaires (le nécessaire étant la négation du contingent).

2. Une unification à grande échelle : relativité générale et cosmologie.

La description du cosmos à grande échelle est une des modalités du projet unificateur, puisqu'il s'agit de trouver une description unique qui permettrait d'appréhender le monde en totalité (« l'uni-vers »). Il faudrait dire pour être plus exact, le monde à grande échelle. Des obstacles philosophiques se sont levés contre cette prétention.

Tout d'abord, la volonté de décrire l'univers en totalité nécessite de représenter l'espace d'une autre manière qu'en référence à l'intérieur et à l'extérieur du monde. Dans ce sens, Gauss et Riemann ouvrent la possibilité d'une description d'espaces (de « variétés ») à l'aide de coordonnées intrinsèques qui conduit à celle d'une représentation géométrique d'objets sans devoir adopter un point de vue extérieur. Ainsi, la topologie du dix-neuvième siècle montre que des objets peuvent très bien ne posséder ni bord, ni aucun « extérieur ».

L'espace ayant reçu un sens géométrique, il fallait encore que l'univers en totalité puisse recevoir un sens physique. Ceci fût réalisé par la relativité générale. Einstein, en généralisant l'équation de Poisson de la gravitation classique²⁴, permit d'écrire des équations reliant la géométrie de l'univers (sa courbure) à son contenu physique (l'énergie-matière). Ainsi, l'univers en totalité est conçu comme un objet géométrique, l'espace-temps. Rigoureusement, il n'y a pas des objets dans l'univers, l'univers et ses objets ne font qu'un, sous la forme non pas d'un tissu rigide comme on le pense souvent, mais comme un objet géométrique invariant sous des transformations très générales de coordonnées. L'espace-temps est devenu lui-même une réalité physique, dont les propriétés géométriques expriment des propriétés physiques.

Les équations d'Einstein établissent un lien entre la courbure de l'espace-temps, d'une part, et un terme tenant compte de la densité d'énergie-matière dans l'univers et de l'« énergie du vide » (terme décrit par la constante cosmologique), d'autre part. Ces équations permettent, si l'on donne le terme d'énergie, de calculer la géométrie de l'espace et la manière dont le temps

²⁴ Celle-ci (obtenue à partir d'une version intégrale de la loi de la gravitation universelle de Newton) relie un opérateur différentiel du second ordre (le « laplacien ») appliqué au potentiel de gravitation à un terme de densité de matière. Si on se rappelle que la dérivée seconde décrit une courbure, on voit dans quelle mesure les équations d'Einstein étendent l'équation de Poisson. Le potentiel de gravitation devient chez Einstein la métrique de l'espace-temps.

s'écoule ; autrement dit la géométrie de l'espace-temps²⁵. Mais on remarque que dans les équations d'Einstein l'unification de la géométrie et de la physique a des limites. Einstein lui-même avait fait remarquer que le terme d'énergie-matière n'a pas lui-même d'interprétation naturelle de nature géométrique... Il est issu de considérations phénoménologiques, empiriques. Quelque part, la réalité physique résiste à l'unification géométrique.

Quoiqu'il en soit, la relativité générale donne accès à une description du monde en totalité, à condition de réduire le monde à un continuum et à accepter certaines hypothèses. Les premiers modèles cosmologiques ceux d'Einstein (1917, sphérique et statique), de de Sitter (1917, vide et dynamique), de Friedmann (1922-24) et Lemaître (1927 puis 1931) reposent sur des hypothèses d'homogénéité (densité de matière constante dans l'univers) et d'isotropie (mêmes propriétés géométriques dans toutes les directions de l'univers, par exemple, on n'a pas un univers qui serait en expansion dans une direction et en contraction dans une autre). (Luminet 1987).

L'univers en totalité est donc parfaitement appréhendé. Mais cette totalité n'est conçue de manière pertinente qu'à grande échelle (en gros, celle des amas de galaxies). La vision unifiée du cosmos se paie donc d'une simplification. Si l'on veut expliquer pourquoi et comment les galaxies apparaissent dans l'univers, il faut faire des hypothèses sur les fluctuations d'énergie-matière se produisant dans les premiers moments de son histoire présumée et étayée sur les observations actuelles (par exemple du rayonnement de fond cosmologique : CMB, *Cosmological Microwave Background*). Mais ces hypothèses ne peuvent être déduites directement de la relativité générale. Il faut d'une certaine manière « briser » le cadre bien unifié de la relativité générale et descendre dans une description fine que livre la théorie quantique.

Par ailleurs, il est intéressant de noter, pour notre propos, que la description unifiée que nous avons aujourd'hui de l'univers repose sur un certain nombre de quantités qui ne sont pas déduites d'une théorie (la relativité générale) mais fixés par l'observation. La densité d'énergie-matière et la valeur (positive) de la constante cosmologique, par exemple, doivent être observés. En fait, on est toujours ramené au problème qui consiste à devoir déterminer les modèles cosmologiques par la valeur des grandeurs observées actuellement. Par exemple,

²⁵ $R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$; terme décrivant la courbure : $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - 1/2 R g_{\mu\nu}$ ($R_{\mu\nu}$ est le tenseur du de Ricci avec sa trace R) ; terme décrivant l'énergie-matière : $T_{\mu\nu}$ (tenseur d'énergie-impulsion) ; terme décrivant l'énergie de l'univers vide (« énergie noire » : $\Lambda g_{\mu\nu}$ avec Λ la « constante cosmologique » qui si elle est positive donne naissance à un terme se comportant comme une gravité répulsive.

l'observation des grandes structures (galaxies, amas de galaxies, superamas de galaxies, ...) impose des contraintes sur la valeur de la constante cosmologique et l'isotropie de l'univers.

Le caractère homogène de l'univers à grande échelle a amené à faire l'hypothèse de l'« inflation ». En effet, dans l'univers « très » primordial les différentes régions n'ont pas eu le temps de s'homogénéiser (car elles étaient séparées causalement). Dès lors, on ne comprend pas comment l'univers, qui est en expansion et qui a éloigné très rapidement ces diverses régions, aurait pu être homogène. On fait alors l'hypothèse que l'univers a été dilaté d'un facteur énorme. Et si nous observons un univers homogène aujourd'hui, c'est en raison du fait que nous nous trouvons dans une « petite » région homogène (qui se trouve à côté de régions très inhomogènes), qui a été dilatée énormément (et nous ne voyons pas ce qui reste au-delà de l'horizon...). Mais l'inflation elle-même n'est pas théoriquement prévue par la relativité générale. Pour la décrire et pour retrouver l'homogénéité observée à grande échelle dans notre univers, il faut introduire « à la main » un ou plusieurs champs : des dilatons.

On n'a donc pas, en cosmologie, une unification totale. Nous avons, d'une part, des hypothèses simplificatrices (homogénéité et isotropie), qui ne sont ni déduites d'une théorie plus générale ni justifiée à des petites échelles de distance (celle d'une galaxie, par exemple). D'autre part, le modèle cosmologique (dit « standard ») repose sur des grandeurs qui doivent être fixées par l'observation. Bien entendu, le but serait de déduire, par exemple, l'existence et la valeur précise de la constante cosmologique à partir d'une théorie fondamentale (et nous sommes sur la voie pour cela.) Mais cela n'est pas encore fait, et nous pourrions nous demander si cela pourrait être réalisé pour toutes les grandeurs phénoménologiques du modèle. On peut espérer qu'une théorie fondamentale explique la valeur précise de la vitesse de la lumière, par exemple en montrant que la valeur d'une certaine fonction ne peut valoir que cette valeur, en raison de contraintes venant de symétries, ... Cette théorie apporterait donc une réponse numérique pour une unification cosmologique. Mais cette réponse ne satisferait pas à toutes les questions, par exemple, nécessaires ou contingences, celles qui concernent les raisons de l'émergence de la vie.

En revanche, les mathématiques seront peut-être efficaces pour trouver une explication numérique à la valeur des constantes physiques. (Kilmister 1994). On se rappelle qu'Eddington a essayé de trouver des explications fondamentales de ces paramètres et constantes en travaillant sur les propriétés des algèbres de Clifford, en particulier de celle qui sert à construire les matrices qui interviennent dans l'équation qui décrit l'électron relativiste : « l'équation de Dirac ». On a souvent considéré cette démarche avec dédain comme de la « numérologie ».

Mais, au fond, l'intention était tout à fait pertinente. Cependant, elle n'a pas abouti. Il n'y a pas dans la structure des algèbres utilisées (forgées d'ailleurs sur la métrique de l'espace-temps... ce qui n'est pas suffisant pour décrire toutes les interactions fondamentales), assez d'information pour contraindre toutes ces valeurs observées empiriquement.

Plutôt que d'essayer de dériver des valeurs de paramètres et constantes à partir d'une loi fondamentale de notre univers (d'un seul « uni-vers »), on pourrait faire appel à une théorie plus générale prévoyant l'existence de multiples univers (des « multivers ») et peut-être montrer qu'il existe une grande probabilité de se trouver dans le nôtre²⁶. Mais, quelle que soit la théorie envisagée, il faudrait la justifier et en fixer les paramètres fondamentaux, par exemple, la probabilité dont on vient de parler ferait référence à une mesure de probabilité dont il faudrait justifier la forme. On retrouverait alors une nouvelle limite à l'unification, plus exactement la référence à un certain nombre de choix particuliers qui ne peuvent être reliés (unifiés), déductivement à un cadre général (par exemple des équations générales soumises à des symétries...).

L'existence de plusieurs univers parallèles peut entrer dans le domaine de la science dans la mesure où l'on met le doigt sur des phénomènes qui pourraient la mettre en évidence. Il existe des mesures sur la disparition de neutrons dans des flux intenses de telles particules aux abords des réacteurs nucléaires (expériences de neutrons dits « passes-murailles » : qui disparaîtraient dans des univers parallèles).²⁷ Mais, si on se penche sur de telles mesures, on voit qu'elles reposent sur des hypothèses. Par exemple, il faut imaginer la nature géométrique de l'espace (le « *bulk* ») dans lequel sont plongés ces univers parallèles (ces « *branes* » comme disent les physiciens). Il faut aussi expliquer pourquoi ces univers apparaissent dans ce « *bulk* ». Souvent, on les représente comme des « défauts topologiques » liées à des champs additionnels qui sont introduits pour les besoins de la cause.

En fait, on se rend compte que si de manière idéale on voudrait mettre la main sur une théorie unitaire à partir de laquelle on pourrait déduire tout ce que l'on observe dans l'univers actuel, dans les faits, les observations disponibles actuellement permettent de restreindre un certain nombre de théories possibles, mais sans jamais en identifier une et une seule. En permanence,

²⁶ Dans certaines théories de la gravitation quantique comme celle, ancienne, de Wheeler-De Witt, on utilise une sorte d'équation de Schrödinger permettant de trouver une fonction d'onde d'univers (dont la variable est la métrique d'un espace-temps), dont le carré du module donne la probabilité d'obtenir une géométrie donnée d'univers (une métrique).

²⁷ C.Stasser, *Conception d'une expérience bas-bruit pour la détection de transition neutron-neutron caché et recherches de contraintes sur la proximité d'une brane cachée dans le bulk*, Thèse de doctorat en physique, Université de Namur, 29-10-21.

on doit faire des hypothèses *ad hoc* qui ne reposent pas sur une théorie générale, mais simplement sur la volonté de rejoindre l'observation. On arrive à la situation suivante : l'unification est un idéal, mais qui ne parvient pas actuellement à se réaliser.

De ce fait, on peut dire que, soit cette unification se réalisera, mais le moment n'est pas encore venu, soit qu'il existe un obstacle de principe qui empêche de la réaliser. Quel argument pourrait-on faire valoir pour affirmer que cette unification ne peut être atteinte ? Ces arguments sont peut-être de nature logique (une théorie unitaire complète devrait s'auto-justifier, s'auto-fonder, mais cela est-il logiquement concevable ?). Mais il pourrait aussi se faire que la science elle-même ne puisse découvrir un argument probant simplement parce que la nature de l'être du monde ne serait pas entièrement appréhendable en termes de légalité, de nécessité, et cela en raison d'une contingence fondamentale de l'être.

Supposons qu'il y ait de la contingence pure : il existe des phénomènes qui ne sont le produit d'aucune régularité identifiable, d'aucune nécessité, c'est bien cela la contingence, la négation de la nécessité. Alors une théorie unificatrice totale ne serait pas réalisable. Les théories ressemblant à cette dernière ne seraient que des théories unifiant des champs de phénomènes « réguliers ». Mais remarquons tout de suite que la question de l'existence d'une contingence pure ne pourrait pas être mise en évidence par la science : car l'absence actuelle totale d'une loi (ce qui traduirait la contingence pure) ne peut être transformée en une « loi de l'absence » : loi qui expliquerait l'inexistence d'une loi. Ce serait contradictoire. Cependant, l'aveu de l'existence d'une véritable contingence est difficile en physique car il n'est de science que du nécessaire.

De ce point de vue, philosophiquement, la question des multivers est intéressante, car elle montre que les physiciens, dans leur quête d'unification, ne veulent pas, ou ne peuvent pas, s'arrêter à une situation où ils accepteraient une certaine contingence, c'est-à-dire une « non-nécessité » de certaines grandeurs (le caractère non-dérivable de ces dernières à partir d'une loi donnée a priori). Le projet unificateur se traduit par une sorte de volonté de résorber la contingence dans la nécessité. Mais, il se pourrait bien que cela ne puisse être ultimement justifié par la science empirique elle-même.

En effet, qu'il y ait fondamentalement seulement de la nécessité ou de la nécessité alliée à de la contingence, ceci procède d'un arrière-fond métaphysique, et de ce fait, de quelque chose qui ne relève pas d'une observation directe et immédiate de la physis, de la nature. En fait, si l'on veut rester en science et ne pas entrer directement dans le champ philosophique, la seule

« science du contingent » serait une science a posteriori, interprétant ce qui se produit à partir de la reconnaissance de l'évènement contingent (fluctuation, singularité, ...) Bref, une science herméneutique comme l'est l'histoire. Mais la physique devrait accepter d'intégrer des schèmes herméneutiques en plus de ses schèmes déductifs ! ²⁸ Il y a du nécessaire et du contingent, mais certains événements véritablement contingents ne peuvent faire l'objet d'une prédiction ou d'une rétro-diction (même à partir des probabilités ou des statistiques): c'est justement ce qui tombera sous la coupe de l'impréconcevable (la physique doit peut-être intégrer une description a posteriori de ce qui était impréconcevable = de ce qui est historique).

3. L'unification problématique de la mécanique quantique et de la relativité générale : des formalismes inconciliables ?

En mécanique quantique, l'état d'un système est décrit à une phase près par un vecteur dans un espace de Hilbert (espace vectoriel complet possédant un produit scalaire). Un système quantique (quand il n'est pas observé) est décrit par une superposition (une combinaison linéaire) de tels vecteurs et leur évolution est donnée par une équation : celle de Schrödinger. L'évolution d'un système quantique non-observé peut se voir comme la transformation d'un état à un autre sous l'effet d'une symétrie que l'on qualifie d'unitaire (c'est une sorte d'analogue d'une isométrie dans l'espace euclidien).

Lorsque le système est observé, une sorte de brisure de symétrie se produit. L'évolution n'est plus unitaire et la superposition d'états se projette sur un état donné. On a alors ce que l'on désigne par la « réduction du paquet d'onde ». Cette « réduction » est décrite comme une projection, mais son explication profonde (pourquoi intervient-elle maintenant et là...) n'est pas contenue dans le formalisme sous-jacent à l'équation de Schrödinger.

Dans l'interprétation standard (de Copenhague), on parlerait ici d'un phénomène purement indéterministe, dont on peut calculer la probabilité (et seulement elle) à l'aide de l'état quantique. Pour obtenir une explication vraiment unifiée des phénomènes, on devrait obtenir une *explication* (et pas seulement une description) non seulement de l'évolution d'un état (nous l'avons), mais aussi de la réduction du paquet d'onde (nous en avons une description par une projection mais pas une explication).

²⁸ Certains physiciens ont cherché à introduire une dimension plus historique dans leurs explications : cf. le livre ancien de Th. Vogel, *Pour une théorie mécaniste renouvelée*, Henri Gauthier-Villars, 1973.

Dans le formalisme quantique, quelque chose reste comme une faille, irréductible dans l'explication unifiée totale. On voit bien qu'il existe des tentatives de combler cette faille avec la notion de « décohérence » (Giulini, 1996), mais sans y parvenir totalement. Mais pourrait-on y parvenir ? Si l'indéterminisme est fondamental, alors il n'y a aucune chance d'y parvenir. Une contingence va rester comme un obstacle à la nécessité. Mais si l'indéterminisme n'existait pas ? C'est ce que nous allons envisager dans un instant.

Remarquons une autre chose intéressante. La superposition des états est un phénomène caractéristique du monde quantique (du monde non pas seulement microscopique mais du monde caractérisé par une « action » de l'ordre de la constante de Planck ; l'action est une grandeur physique qui a les dimensions d'une énergie fois un temps : $E.t$, ou d'une longueur fois une quantité de mouvement : $x.p$; p étant le produit d'une masse par une vitesse).

En physique classique, c'est-à-dire celle qui décrit des corps localisés, macroscopiques, on ne trouve pas de superposition d'états (il n'y a pas de « chat de Schrödinger » mort et vivant à la fois). La réduction du paquet d'onde constitue une transition d'un monde à l'autre, du quantique au classique. Supposons qu'il n'existe pas d'explication profonde de cette réduction et seulement une description, mais décrire n'est pas expliquer. Or, c'est ce qui est le cas aujourd'hui. Alors, cela voudrait dire que l'on pourrait légitimement admettre une sorte de stratification dans le monde physique : monde quantique-monde classique. Ceci justifierait une sorte d'autonomie des disciplines (quantique et classique) qui peut-être renverrait à une stratification ontologique (une pluralité de niveaux correspondant à une pluralité de réalités). De fait, s'il n'existait pas d'unification ultime des niveaux (du point de vue épistémologique), cela pourrait vouloir dire (mais pas nécessairement bien entendu) qu'il existe une « ontologie pluraliste ».

On pourrait objecter qu'il existe diverses interprétations de la mécanique quantique, dont certaines sont déterministes. Ceci est tout à fait vrai. La théorie de Böhm (Gondran 2014) restaure un déterminisme (il existe bien des trajectoires...), mais en conservant le caractère non-local tout à fait essentiel au monde quantique (l'équation caractéristique de la théorie comporte un potentiel non-local). Cette théorie, en général sous-estimée, permet de redonner les résultats de la mécanique quantique habituelle. Cependant, chose intéressante, une dimension probabiliste réapparaît dans le hasard qui peut affecter le choix des conditions initiales. On retrouve de nouveau une facette de la dualité irréductible (ici de fait) entre le formalisme général et le choix de conditions initiales particulières.

Le problème fondamental contemporain est celui de l'unification de la mécanique quantique et de la relativité générale. De multiples tentatives ont été réalisées pour la construire. Cependant, on se heurte à une série de difficultés que nous n'allons pas décrire en détails. Disons simplement que la mécanique quantique repose sur un formalisme linéaire (lié à la structure d'espace vectoriel de l'espace de Hilbert), tandis que la relativité générale repose sur un formalisme non-linéaire (lié à la nature des équations d'Einstein gouvernant la métrique). La quantification introduit une possibilité de discrétisation de certaines grandeurs (on peut avoir un spectre discret d'énergie, d'impulsion...), tandis que la relativité générale fait appel à des grandeurs continues (sauf dans le cas de points singuliers). En mécanique quantique, on a des comportements non-locaux, non-séparables, qui manifestent une situation où l'espace ne « compte plus » (phénomène de corrélation à distance, téléportation quantique, ...). En relativité générale, c'est le temps qui semble perdre une importance spécifique car espace et temps sont géométrisés et fondus dans un espace-temps. En mécanique quantique, on construit la théorie à partir d'un espace-temps supposé donné à l'avance. En relativité générale au contraire, on a un espace-temps qui n'est donné qu'à des transformations très générales près (des difféomorphismes !) et qui fait apparaître l'espace-temps comme un « mollusque de référence », comme disait Einstein. En relativité générale, l'espace-temps est lui-même un « objet » de la physique qui est affecté par l'énergie-matière. Au contraire, en mécanique quantique, l'espace et le temps constituent un cadre rigide. Le temps en mécanique quantique n'est rigoureusement pas « quantique », il ne lui est pas associé d'opérateur.²⁹

Quand on tente de quantifier la relativité générale, on peut commencer par écrire celle-ci dans un formalisme hamiltonien, dans un formalisme qui est comparable à celui de la mécanique classique. Puis, remplaçant les grandeurs classiques par des opérateurs, on pourrait espérer obtenir une relativité générale (et une gravitation) quantifiée. Mais, on se heurte à des obstacles dont l'un des plus importants précisément concerne le temps. Il n'y a pas moyen de définir un opérateur temps. Ce qui est normal car au fond le temps issu de la relativité générale est une grandeur géométrisée qui ne possède guère les caractères du temps. En fait, la relativité générale est compatible avec une interprétation dans laquelle le temps ne s'écoule pas, mais est seulement une coordonnée géométrique décrivant une variété (« univers-bloc ») quadridimensionnelle totalement déployée.

²⁹ Cf. le chapitre 4 de la partie III « Gravity » de J. Baez, J.P. Munian, *Gauge Fields, knots and Gravity. The ADM Formalisme*, Singapore, Word Scientific, 1984, pp. 413-436.

Il est probable que l'on découvrira une manière de conjoindre la relativité générale et la mécanique quantique à partir d'une théorie plus générale dont ces deux théories seront seulement des approximations. Cela n'est pas du tout impossible et des tentatives sont présentes aujourd'hui dans la théorie des super-cordes, dans la théorie de la gravité à boucles et en géométrie non-commutative (Connes 2009). Ces théories ont toutes leurs limites, mais ce qui nous intéresse ici est de réaliser que des cadres existent donnant des intuitions pour une unification des formalismes. Par exemple, le fait qu'une géométrie existe dans laquelle les variétés peuvent être définies à partir de coordonnées qui ne commutent pas comme les opérateurs de la mécanique quantique. Cette géométrie non-commutative ouvre une voie en direction d'un cadre théorique qui réconcilierait, d'une part, l'aspect géométrique de la gravitation et l'aspect non-commutatif des algèbres d'opérateurs de la théorie quantique. Nous ne pensons pas, au vu des recherches récentes, que les formalismes resteront irréconciliables.

Cependant, ceci ne résoudra pas le problème auquel nous faisons allusion : sera-ce cette même théorie unitaire qui permettra de « rétrodire » et d'expliquer les valeurs des constantes h (de Planck), c (de la lumière), G (de la gravitation), ... ? Si les intuitions pour la constitution d'une unification entre la relativité générale et la théorie quantique ne manquent pas, il ne semble pas que l'on puisse en dire autant d'une théorie (comme celle dont rêvait Eddington) qui fixerait, en en procurant une explication, la valeur de ces constantes. Mais ces constantes marquent aussi indirectement des domaines (et des échelles) de phénomènes qui pourraient apparaître sans cette explication comme radicalement (et de manière contingente) distincts. Comme nous l'avons signalé plus haut, par exemple, le domaine des phénomènes dans lesquels $x.p$ (espace fois quantité de mouvement) et $E.t$ (énergie fois temps) sont proches de la constante de Planck (divisée par 2π) est le domaine quantique dont les caractéristiques sont différentes de celui des phénomènes classiques (caractérisés par une vitesse de la lumière infinie et par la nullité de la constante de Planck). Si l'on ne donne pas une explication fondamentale et unifiée à la valeur de toutes ces constantes, on doit se résoudre à penser qu'il existe des domaines de phénomènes radicalement autonomes, ou pour le dire autrement, séparés de manière contingente (sans nécessité fondamentale). Ceci entraînerait alors la possibilité philosophique d'une sorte d'ontologie plurielle ou d'un pluralisme ontologique avec des régions d'êtres distincts dont la différence doit être pensée de manière contingente.

4. La philosophie de la renormalisation :

L'unité est-elle nécessairement fondée sur « une » loi fondamentale ?

Jusqu'à présent, nous avons fait l'hypothèse qu'il existait toujours pour décrire les phénomènes des lois fondamentales exprimées mathématiquement (caractérisées par des paramètres non expliqués par ces lois) dont la résolution demandait que l'on donne des conditions initiales ou aux frontières (caractérisant la situation empirique particulière dans laquelle nous nous trouvons). Mais cette hypothèse n'est pas évidente. Et les développements de la théorie des champs, et aussi de la mécanique statistique, ont amené un autre point de vue appelé la « philosophie du groupe de renormalisation » que nous avons déjà évoqué plus haut. Nous ne pouvons entrer dans les détails de cela, ni même en évoquer l'histoire qui a fait l'objet d'études précises et techniques. Nous n'en donnerons que les idées majeures utiles pour notre réflexion. Donnons deux illustrations intuitives : La première est tirée de la construction d'un fractal. (Falconer 1990). La deuxième est issue de la thermodynamique.

a.) Apport de la construction en fractale : l'invariance d'échelle.

Prenons un intervalle de longueur L sur la droite, puis divisons le en trois parties égales de longueur $(L/3)$. Enlevons la partie centrale et remplaçons-la par une pointe triangulaire faite de deux morceaux de longueur $L/3$. Nous obtenons une figure formée de 4 morceaux de longueurs $L/3$. La longueur est donc passée de L à $4L/3$. Re commençons l'opération et divisons chaque segment de longueur $L/3$ en trois parties égales et enlevons la partie centrale. De nouveau remplaçons cette dernière par une pointe faite de deux segments de longueur $L/3^2 = L/9$. Nous arrivons donc à une courbe de longueur $4^2/3^2$. Si nous itérons le processus, nous obtenons à la limite une courbe de longueur infinie ($4^n/3^n$ tend vers l'infini quand n tend vers l'infini), continue et partout non-dérivable. Cette courbe est un « fractal », figure auto-similaire (la même forme localement à toutes les itérations).

Ici, nous voyons qu'il n'est pas nécessaire pour appréhender les propriétés du fractal de connaître tous les détails de cette courbe à des échelles microscopiques. Nous pouvons en observant la courbe à certaines échelles proches de la nôtre (on suppose que n petit correspond aux échelles qui nous sont accessibles) et en tirer des propriétés globales. Par exemple le quotient : L^{n+1}/L^n des longueurs à deux échelles différentes donne toujours $4/3$ qui est un paramètre caractérisant ce fractal (sa dimension... fractionnaire). Cette situation est une sorte

d'analogie géométrique de ce qui se passe dans le « groupe de renormalisation ». Nous n'avons pas besoin de descendre au niveau le plus fin (le plus fondamental). En comprenant ce qui se passe dans le processus de changement d'échelle, ce qui reste invariant dans ce changement, on peut arriver à caractériser des propriétés importantes de la réalité à notre échelle.

Il est intéressant de noter que les phénomènes d'invariance d'échelle sont très courants en physique (Benhamou 2007). Un certain nombre d'équations comme celle de la chaleur, de réaction-diffusion, de Fisher (en génétique), de dispersion d'un insecte invasif,... présente de telles propriétés d'invariance d'échelle qui caractérisent leurs solutions. Nous ne pouvons pas détailler ce point, mais pour le philosophe des sciences, ceci est particulièrement significatif, car cela indique la possibilité qu'une description d'un phénomène ne demande peut-être qu'à faire intervenir des propriétés d'échelle et non la référence à une échelle qui serait fondamentale et qui demanderait une description elle-même fondamentale...

De plus, les effets d'échelle (invariances et types de variations) ne sont pas intéressants que pour la réflexion philosophique, mais aussi d'un point de vue pratique, en particulier pour les ingénieurs, qui font des travaux « sur les moyens expérimentaux de caractérisation des matériaux, sur les méthodes de calcul et sur leurs applications aux structures ». De plus, elles permettent de mieux comprendre « certaines théories, d'en mesurer les limites de validité et donc aussi de porter un jugement (...) sur les techniques de dimensionnement actuelles et sur les règles de calcul », comme l'explique Gilles Pijaudier-Cabot. (Bazant, Zuber, Pijaudier-Cabot 2004).

b.) Apport de la thermodynamique : les classes d'universalité.

Supposons que nous ayons un système formé de petites cellules qui peuvent ou non être occupées. On peut penser à une roche où les cellules sont des cavités où un liquide a pu percoler. Supposons que cette occupation est aléatoire et fonction d'un paramètre externe (par exemple, dans le cas d'un liquide ou d'un gaz qui pénètre dans une roche et qui occupe des espaces, on peut penser à la pression). Plus la valeur du paramètre est grande, plus les cellules ont tendance à être occupées et à former des grands ensembles de cellules qui sont toutes occupées. Si nous voulons caractériser cette situation, nous pourrions imaginer de regarder ce système à toute une série d'échelles.

Le changement d'échelle, un « zoom », pourrait être décrit de la manière suivante. Groupons les diverses cellules en des ensembles identiques de N cellules. Puis, remplaçons chacun de ces ensembles par une nouvelle cellule qui est occupée, si et seulement si, une certaine proportion

de ces N cellules est occupée et non-occupée sinon. Re commençons plusieurs fois l'itération. Nous obtenons trois situations. Si au départ il y avait peu de cellules occupées, (une valeur du paramètre externe, la pression, faible) les itérations vont converger vers une situation où toutes les cellules seront non-occupées. Si beaucoup de cellules sont occupées (une valeur du paramètre externe, la pression, forte), la majorité disons, alors on convergera, au cours des changements d'échelle, vers une situation où toutes les cellules sont occupées. Ce qui est intéressant, c'est une situation où à chaque itération on retrouve une situation similaire où l'on a, grosso modo, autant de cellules occupées que de cellules non-occupées.

Cet état symétrique, qui est un point fixe du processus de changement d'échelle, traduit une propriété physique importante : c'est le point de transition entre l'état où les cellules ne sont pas occupées (et où, par exemple, dans le cas du liquide, il ne traverse pas, il ne percole pas la roche !) et celui où elles seraient pratiquement toutes occupées (le liquide a ici percolé dans la roche !) Cette itération est une bonne image du groupe de renormalisation (de Kadanov et Wilson) et le point de transition est un point fixe du groupe de renormalisation exprimant une propriété physique intéressante (dans notre exemple, la transition de percolation). Remarquons ici que les détails des comportements locaux des cellules n'est pas important. Ce qui compte, c'est le comportement du système sous changement d'échelle pour chaque valeur du paramètre externe. Et ce comportement peut être décrit par des paramètres (exposants critiques) qui d'ailleurs peuvent caractériser non pas un seul système, mais une classe de systèmes différents, appelée « classe d'universalité ».

Dans cette perspective épistémologique assez nouvelle, et relativement peu exploitée, cela ne servirait à rien de poursuivre le mythe de la théorie unitaire unique. Le bon point de vue serait celui où l'on comprendrait la nature en regardant des phénomènes pouvant être décrits par des classes de théories, qui auraient les mêmes propriétés lorsqu'on les soumet à des processus de changement d'échelle. Le seul point fondamental que l'on pourrait admettre ici serait le recours à des symétries qui servirait de point de départ. Il faut supposer même, si on ne connaît pas les détails d'un système à toutes les échelles, qu'il possède tout de même certaines symétries. C'est ce que l'on fait d'ailleurs en théorie des champs (on impose une covariance relativiste...).

Imaginons que l'on défende à tout prix la thèse que l'on ne connaît rien en physique si l'on n'a pas atteint une description fine par une équation fondamentale. Un objectant pourrait répondre ici que l'on n'a pas besoin de connaître la description fine du système, car ce que l'on mesure au fond ce sont des propriétés invariantes d'échelle à partir de notre échelle... des propriétés effectives ! Le défenseur de l'équation fondamentale devrait alors fournir un argument pour

prouver que celle-ci n'est pas une relation d'une théorie effective. Mais il ne semble pas que nous puissions exhiber un tel argument.³⁰

Ces deux exemples montrent la chose suivante. La connaissance du comportement fin, à des échelles inférieures à celles où l'on observe les phénomènes n'est pas toujours nécessaire à leur explication. Des tas de détails non-pertinents disparaissent de l'explication utile et ne jouent finalement aucun rôle. La description du niveau que l'on voudrait appeler « fondamental » n'est donc pas nécessairement requis et seulement certaines hypothèses sur des symétries, par exemple, sont importantes. Au fond, c'est la référence à une classe (dite d'universalité) de théories fondamentales qui est importante et non pas à une et une seule théorie unitaire. Ce que nous venons de voir est un cas particulier du « groupe de renormalisation », dont certains auteurs ont découvert l'intérêt philosophique (Lesne 1996).

L'idée est ici la suivante. On montre que dans bon nombre de situations, une théorie qui décrit un phénomène à une certaine échelle peut être obtenue à partir d'un grand nombre de théories fondamentales différentes (caractérisées par des paramètres différents) décrivant ce qui se passe à une échelle inférieure (et satisfaisant simplement toutes à des critères de symétrie commune), en effectuant des opérations de changement d'échelle (en gros, c'est cela la renormalisation).

Dans cette opération, toute une série de variables des théories fondamentales s'éliminent et il ne reste qu'un certain nombre de variables essentielles, qui décrivent le phénomène à l'échelle supérieure³¹ par une théorie « effective », qui apparaît comme un point fixe du groupe de renormalisation. Ceci veut dire, du point de vue épistémologique, que l'on peut toujours décrire les phénomènes à une certaine échelle par des théories « effectives », qui sont indépendantes des descriptions fines à échelles inférieures. Une théorie peut décrire les quarks à l'échelle subnucléaire et une autre les équations de l'écoulement de fluides macroscopiques, les deux théories ayant une indépendance (car certains paramètres décrivant les entités microscopiques s'éliminent lors du changement d'échelle). Du point de vue ontologique, on pourrait soutenir que les référénts (ce à quoi réfèrent les théories : leurs objets, leurs réalités) des théories indépendantes (mais seulement reliées par des opérations du groupe de renormalisation), qui décrivent les phénomènes à différents niveaux peuvent être considérés comme des objets

³⁰ Par exemple, il faut réfléchir sur la possibilité de trouver un argument prouvant que les équations de Maxwell sont fondamentales ou au contraire sont l'expression d'une théorie effective ayant « effacé » les détails fins de niveaux plus fondamentaux.

³¹ Nous comprenons ici que le théorème central-limite fait une belle illustration de cette opération de renormalisation. La distribution de Gauss jouant ici le rôle de la théorie effective à l'échelle supérieure.

irréductibles (un quark et un fluide macroscopique ; un atome et une cellule ; une molécule et une galaxie...).

D'un point de vue relatif, ce sont des référents correspondant à des théories qui sont indépendantes, même si elles peuvent être reliées par une transformation de renormalisation. Mais, précisément, cette transformation efface certains des paramètres de l'une avant d'arriver à l'autre, ce qui donne sens à l'indépendance des théories et à l'irréductibilité des référents. C'est donc le fait, que lors de l'accroissement du nombre d'entités et de leurs interactions (mesure de complexité) des paramètres (dits « irrelevants ») disparaissent, s'évanouissent (comme le montrent le théorème central-limite et le groupe de renormalisation), qui fonde une possible autonomie irréductible des disciplines et un pluralisme ontologique (relatif). « Relatif » voulant toujours dire que les niveaux (et les disciplines) et les substances peuvent être « reliés », mais que cette relation efface certains détails rendant les niveaux et les référents différents ! Du point de vue épistémologique, nous pouvons donc dire que l'on n'est pas obligé de recourir à un niveau qui serait le plus fondamental (particules...) pour expliquer les phénomènes se passant à des niveaux supérieurs, d'où la légitimité d'un savoir stratifié en disciplines (relativement) irréductibles : physique, chimie, biologie (qui n'a pas besoin des quarks).

Du point de vue ontologique, on pourrait dire que le monde n'est pas nécessairement fait d'un et un seul type de réalité. Le pluralisme des substances d'Aristote pourrait être soutenu, mais pas de façon absolue en disant : le monde est de fait constitué d'une multitude de niveaux, chacun étant décrit par des théories différentes (reliées par des transformations de renormalisation), les référents de ces théories pouvant être considérés comme des « substances » différentes possédant chacune leur autonomie. La manière de concevoir la physique est profondément changée par la philosophie de la renormalisation. En effet, la physique peut être vue ici comme une tentative de remonter à partir de descriptions empiriquement adéquates à une échelle à des descriptions fondées sur des niveaux plus fins (cette démarche est appelée le « reverse coarse graining »). Mais de multiples théories décrivant ces niveaux sont susceptibles de redonner, après renormalisation, la même théorie effective. On ne peut donc plus chercher « La » théorie fondamentale ! ³²

³² Nous rejoindrons ici Kerson Huang, *Quantum Field Theory. From Operators to Path Integrals*, New York, John Wiley, 1998, p.341.: "Through free convictions physicists had remarkable success in the seemingly impossible task of reverse Coarse graining. In this they have guided by the faith that a true theory must be beautiful." Mais justement, cette conviction qui n'est pas soutenue par un argument formel n'est qu'une conviction ou plutôt une sorte d'idée régulatrice proprement philosophique !

La diversité des référents

Branches de la physique	Référents	Caractérisation possible
Physique des particules	Rayonnement électromagnétique	Quantum
Physique nucléaire	Nucléons (protons et neutrons) stable ou instable (radioactivité)	Isotope, (nombre de neutrons) Charge, (nombre d'électrons)
Chimie	Atomes Molécules	Numéro atomique (nombre de protons) Nombres d'atomes
Ingénierie	Matériaux	Composant
Astronomie et astrophysique	Planètes du système solaire Etoiles Galaxies et amas de galaxies	Masse, rayon, densité Rayonnement (magnitude) Trou noir et grand attracteur
Cosmologie : Théorie de la relativité générale	Univers espace-temps	Gravitation, Courbure de l'espace-temps par la matière

Conclusion du chapitre 1.

Ce qui échappe à l'unification physique.

Dans le survol rapide de la physique contemporaine que nous venons de proposer, nous avons mis en évidence une double origine possible de ce que nous pourrions appeler l'impossible unification complète des descriptions de la nature par la physique. Il ne s'agit pas tant de l'impossibilité de trouver un formalisme mathématique qui pourrait construire une unité partielle. Mais c'est la question de savoir si ce formalisme pourrait s'identifier ultimement à un système totalement déductif fondé sur une et une seule loi fondamentale. La conclusion de notre analyse conduit à penser que deux éléments résistent à une unification totale des théories physiques.

Tout d'abord, les équations fondamentales nécessitent pour être efficacement appliquées qu'on fournisse des conditions initiales, des conditions aux frontières et des paramètres fondamentaux. Les conditions initiales et aux frontières caractérisent en fait les situations particulières (contingentes ?) dans lesquelles nous nous trouvons. Or, de fait, nous observons que dans la description donnée par la mécanique quantique, quelles que soient les interprétations, les conditions initiales sont affectées soit d'un hasard intrinsèque, soit d'un hasard lié aux limites de nos capacités d'observation. Or, ces deux sources sont d'une certaine manière irréductible. Supposons même que ces conditions soient parfaitement déterminables et déterminées. Il faudrait encore trouver une théorie qui les expliqueraient. Mais, cela reviendrait à rejoindre la question de la détermination des paramètres fondamentaux qui sont présent dans les équations. La théorie devrait pouvoir s'auto-justifier. Mais cela est-il ultimement et logiquement possible ?

Il est fort probable que nous aurons des formalismes de plus en plus généraux, englobants et unificateurs des descriptions des phénomènes physiques. C'est d'ailleurs ce qui s'amorce sous nos yeux aujourd'hui. On a pas mal de raisons de penser qu'une unification des formalismes « universels » est bien possible. Ce que nous voulons dire, c'est que ces formalismes peuvent se relier, et nous pouvons penser leur unité. Par exemple : la structure symplectique de la mécanique classique peut être déformée pour retrouver le cadre quantique. Le passage des « crochets de Poisson » classiques aux commutateurs quantiques en est une illustration. La

quantification (sous toutes ses formes) permet de penser cette unification des formalismes. Autre exemple, le formalisme canonique (hamiltonien) peut être exhibé en relativité générale, alors qu'il est la base de la mécanique classique. A son tour (même si cela n'aboutit pas totalement) ce formalisme canonique peut laisser envisager une quantification de la relativité générale...

Beaucoup de penseurs estiment que l'unification totale n'est pas une vaine quête. Nous pouvons leur concéder cela, mais une unification vraiment totale n'est pas seulement celle des formalismes universels, elle demande aussi de comprendre l'unification des équations générales et des conditions particulières qui leur sont associées pour déterminer les solutions qui correspondent, effectivement, aux situations contingentes. Et cela est un des aspects souvent oubliés du programme d'unification... même si on voit bien que des physiciens comme Einstein, Wigner et d'autres lui avait donné une importance !

L'existence d'équations unitaires n'enlève pas la nécessité du recours aux conditions initiales, aux frontières. Un élément de contingence marque la démarche du physicien. Cet élément pourrait être lié à une ignorance connaturelle aux limites humaines, mais elle pourrait aussi être liée à une contingence fondamentale à l'œuvre dans la nature et déterminant une dimension essentiellement historique. Nous n'avons pas à prendre parti ici pour une représentation métaphysique particulière. Il nous suffit de constater que la dualité « équation fondamentale-condition particulière » semble être rémanente à tout moment des processus d'unification, cette dualité ne parvenant pas à se résorber entièrement dans un formalisme universel.

En outre, nous avons vu qu'il y a plus. Il n'est pas certain que la notion de loi fondamentale soit strictement pertinente. Et c'est cela qui va encore complexifier notre approche. La philosophie du groupe de renormalisation montre que ce que nous croyons être une loi fondamentale pourrait fort bien n'être qu'une théorie effective à une certaine échelle d'observation. Cette loi apparaissant comme émergeant d'une classe de lois différentes, décrivant la nature à d'autres échelles, plus fines, classe caractérisée par des facteurs particuliers (les « exposants critiques »).

Dans cette perspective, la notion importante n'est pas une seule loi, mais une classe d'universalité de lois qui mènent toutes à une certaine échelle vers une loi effective que l'on pense à tort « universelle ». Le point ici est le fait que l'on ne pourrait pas réaliser l'unification sous une loi par le fait même que cette loi n'existe pas. Il n'existe que des lois écrites en suivant certains principes de symétrie, pour constituer une classe qui en changeant d'échelle (processus

de renormalisation) va conduire vers une loi effective à notre échelle. Ceci pourrait expliquer aussi le fait qu'il existe (ontologiquement ou épistémologiquement) des niveaux de descriptions du réel qui peuvent fonctionner de manière autonome. Au fond, dans cette perspective, on pourrait penser que la loi fondamentale ne sera jamais découverte et que nous progresserons seulement de niveau en niveau d'observation, en produisant des descriptions reflétant notre position à une certaine échelle.

Remarquons que philosophiquement ceci pourrait signifier deux choses. D'une part, le réel est stratifié en niveaux, dont les descriptions peuvent être réalisées de manière indépendante. Donc, l'unification totale n'est pas ultimement nécessaire de manière opérationnelle (pour les besoins des mesures, de leurs prédictions et de leurs explications à une certaine échelle). L'unification n'est ici jamais que partielle, entre certains niveaux, réalisée en comprenant la manière dont le groupe de renormalisation relie différentes échelles. Mais, d'autre part, notre point de vue indiquerait une richesse du réel, telle que l'unification totale ne pourrait être réalisée. Celle-ci ne serait en fait qu'une sorte d'idée régulatrice, au sens kantien du terme, guidant un processus d'unifications partielles. La stratification du réel pourrait donner un sens à une ontologie plurielle, mettant en évidence des objets vraiment différents à différentes échelles (particules élémentaires, molécules, cellule, ...). Des ontologies classiques comme celle d'Aristote, par exemple, pourrait dès lors conserver une pertinence (relative, c'est-à-dire dépendante de l'échelle-ici macroscopique- considérée).

De plus, l'impossibilité d'atteindre un niveau vraiment ultime décrit par une et une seule loi unificatrice (qui ne serait ici qu'un horizon), autrement dit l'incapacité de savoir si l'on atteint vraiment « le » fondamental ou si l'on reste seulement dans de « l'effectif » (c'est-à-dire dans une description qui ne prend sens qu'à une certaine échelle non-absolue), pourrait aller de pair avec l'idée d'une « profondeur » du réel. L'idée d'un fond du réel (*grund*) jamais épuisé mais se révélant tout de même, seulement partiellement et progressivement, aux échelles phénoménales (*erscheinung*) pourrait donner un fondement à l'entreprise de construction d'une véritable *philosophie de la nature* tentant de penser l'unité et la profondeur dont les sciences empirico-formelles ne peuvent qu'esquisser les contours toujours fuyants.

Aujourd'hui, le statut d'une telle philosophie de la nature est mis à mal, d'une part, par des pensées qui estiment que le seul discours valide sur la nature serait celui des sciences empirico-formelles ou par des pensées « romantiques » qui entendraient parler de la nature en se coupant de son objectivation et de sa mathématisation par les disciplines scientifiques. Ici, nous retrouverions un chemin réflexif permettant à la fois de donner toute son importance aux

descriptions scientifiques, mais en suggérant que la science elle-même manifeste une limite dans la possible réduction de toutes les descriptions à l'unité ouvrant par là-même une formulation d'une ontologie riche en diversité et en profondeur. La philosophie de la nature serait dès lors ici, mais nous ne développerons pas plus cet aspect pour l'instant, la prolongation naturelle d'une rationalité qui entend penser le réel comme unité et comme profondeur à partir de ce qui s'esquisse déjà dans le domaine des sciences sans pouvoir s'y réaliser complètement.

CHAPITRE 2.

Les sciences du vivant par niveaux de complexité.

Introduction du chapitre 2.

Le lien entre la physique et la biologie :

L'élémentarité du vivant par la biologie moléculaire.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'apport spécifique des diverses branches de la biologie sur la connaissance du vivant. Dans un premier temps, nous étudierons comment peuvent être décrites les formes de vie et leur filiation. Puis, nous détaillerons l'émergence d'un organisme. Enfin, nous passerons de l'organisme à la diversité des organes en décrivant un : le cerveau. L'objectif de ce second chapitre est de décrire la connaissance scientifique du vivant, dont le monde émerge de l'univers physique et se décrit par l'association de la physique à la chimie par la biologie moléculaire, la biophysique. Puis, il s'agit de décrire comment la biologie se distingue des autres disciplines, en pratique, ou de manière plus fondamentale.

Tout d'abord, pour comprendre le vivant, il a fallu comprendre sa formation. Pour cela, la géologie et la paléontologie, notamment, ont largement contribué à la compréhension de la construction du vivant tel qu'il se manifeste aujourd'hui. Ensuite, il a fallu formaliser les processus particuliers propres au vivant : les processus cellulaires, génétiques et neuronaux. Or, il faut constater que de ces processus particuliers émergent de nouveaux modes d'être, des organismes, dotés de facultés particulières, dont la matière est dépourvue au niveau des entités fondamentales de la physique.

En effet, les organismes se comportent différemment des molécules à partir de l'émergence de la cellule, qui opère par division d'elle-même et possède des modes d'agencements particuliers, engendrant des « règnes » variés d'organismes vivants. De plus, au sein de la cellule, les gènes procèdent aussi d'une manière particulière : par codage. Ce procédé engendre la réplification possible d'un individu (clonage) ou sa variation par le brassage chromosomique. Ensuite, il est

possible de classer les individus en fonction de leur anatomie et des facultés qui émergent du développement de certains organes, comme le cerveau, organe d'un système particulier, le système nerveux. Enfin, certains de ces individus sont dotés de fonctions cognitives, relatives à l'organisation des aires cérébrales et des connexions neuronales.

Ainsi, il existe une diversité d'observables dont les effets ne sont pas descriptibles uniquement par la physique. D'une part, la chimie, branche de la physique, permet d'identifier les composants de ces objets. D'autre part, l'association des mathématiques et de l'informatique permettent de formaliser ces systèmes organisés de composants rassemblés sous la notion générique de système complexe. Mais, nous verrons qu'ils ne suffisent pas à décrire ce qui fait l'individualité des vivants. Par ailleurs, l'association de plusieurs autres disciplines, dont la psychologie, est nécessaire pour appréhender les effets particuliers qui émergent à un niveau supérieur d'organisation : des représentations mentales.

En premier lieu, la biologie moléculaire établit un lien entre physique, chimie et biologie, entre l'inorganique et l'organique par la description de macromolécules. Elle correspond donc à un niveau d'observation et à un mode de description particuliers. Le biologiste et philosophe des sciences Michel Morange précise que ce niveau est le lieu « où structure et fonction se rejoignent et où les secondes trouvent leur explication dans les premières », ce qui est un modèle explicatif différent de la physique. Les structures sont donc un mode d'organisation des macromolécules et les fonctions, les effets qu'elles génèrent. D'un point de vue épistémologique, Morange précise que cette discipline permet de comprendre deux « secrets » dont le premier est mis en lumière par la génétique moléculaire. Elle a permis de décoder le code génétique, la structure spatiale des acides aminés formant les protéines, et de comprendre leurs liens dans les diverses « fonctions d'enzymes, de récepteurs et de canaux membranaires, des caractéristiques de l'organisme, ce que les généticiens appellent son phénotype. » Or, les gènes contribuent à « la formation du cerveau. Mais le rôle des gènes y reste imprécis. » (Morange 2016).

Par ailleurs, la biologie cellulaire insiste sur les signaux transmis entre les cellules et sur la place et le rôle des limites membranaires. Il existe de nombreuses branches en biologie, comme dans la physique, en fonction des méthodes d'expérimentation, des instruments de mesure, des modèles descriptifs et explicatifs. D'ailleurs, pour l'historien des sciences Gabriel Gachelin, la biologie moléculaire n'est pas en elle-même une discipline, mais plutôt une forme de description en biologie par l'usage des modifications moléculaires. Il s'agit donc d'avantage d'un mode d'expérimentation particulier pour décrire le vivant à travers cette perspective

particulière. Nous ajoutons qu'elle permet de décrire « l'élémentarité de la vie », comme la physique des particules décrit « l'élémentarité de la matière ».

Ensuite, de ces niveaux d'élémentarités peuvent naître d'autres processus et modes d'organisation. Précisons que la biochimie peut être considérée « comme une branche, devenue autonome, de la chimie organique ». (L'héritier, Lamotte, Pantin s.d) Spécifiquement, la biologie métabolique décrit l'importance des enzymes et la biochimie structurale décrit « quatre grandes catégories de molécules : les protéines, les glucides, les lipides et les acides nucléiques. » (Kamoun s.d) Les protéines sont de longues chaînes d'acides aminés, repliées en des conformations compliquées qui rendent possibles l'apparition de fonctions. La forme permet la fonction : la forme de sac de l'hémoglobine rend possible le transport de l'oxygène dans le sang. La biochimie de l'information s'intéresse à la communication entre les cellules.

En plus de posséder plusieurs branches, ces branches sont parfois très interdisciplinaires. La biologie moléculaire croise plusieurs domaines : la physique, la biochimie et la génétique. Ce croisement permet d'obtenir une connaissance des composants moléculaires à partir desquelles émergent des processus propres au vivant. L'élémentarité de la biologie moléculaire est constituée par les acides aminés, composés moléculaires inorganiques à partir desquels émergent les briques du vivant. Ces briques élémentaires du vivant font le pont entre l'inorganique et l'organique par des réactions chimiques spécifiques. Comme il est expliqué dans l'ouvrage universitaire *La cellule*, dans la fameuse expérience de Miller, « on fait passer de la vapeur d'eau dans une atmosphère contenant CH₄, NH₃ et H₂ et on envoie une décharge électrique. » (Cooper, François, François 1999). Il se forme alors des molécules dites organiques, des acides aminés. Cependant, il faut du temps pour que ces biomolécules apparaissent hors laboratoire, et ce ne sont pas tous les acides aminés nécessaires au vivant qui apparaissaient. Ici, il s'agit notamment de « l'alanine, l'aspartate, le glutamate et la glycine ». (Cooper, François, François 1999). Dans la branche de la génétique, ce sont d'autres biomolécules qui sont les briques élémentaires d'un autre processus propre au vivant, le codage génétique. La génétique identifie « des molécules porteuses du message héréditaire (les acides nucléiques, ADN et ARN) », leur structuration, mode de synthèse et des « modifications ponctuelles ».

Enfin, le génie génétique concerne spécifiquement « les techniques d'intervention sur les acides nucléiques. »³³ La biologie moléculaire met donc l'accent sur la nécessité de certains composés

³³ « Biologie moléculaire », sur *INSERM*, (en ligne : <https://www.inserm.fr/actualite/soutien-recherche-sur-histoire-recherche-biomedicale-appel-2020-2021/>)

moléculaires pour qu'apparaissent la vie telle que nous la connaissons sur Terre. Mais d'autres conditions sont aussi nécessaires à l'émergence du vivant. D'une part, la vie ne peut apparaître et subsister que dans des conditions climatiques tempérées comme celles de notre planète, avec une « pression de surface de 1 bar et une température moyenne de 15 C ». (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). D'autre part, pour que la vie émerge, il a fallu une alternance de milieux, afin qu'apparaissent la cellule.

La cellule est définie, dans le livre *Les planètes et la vie*, comme étant : « l'unité élémentaire du vivant, qui est le lieu de compartimentation et de déroulement d'un ensemble de « réactions biochimiques (le métabolisme), qui permettent à l'être vivant de tirer de l'énergie de son environnement, de subsister, de grandir, et de se reproduire de manière autonome. » Le vivant se caractérise donc par une « différenciation relative au milieu ambiant », d'une part, et une « capacité à utiliser l'énergie du milieu », d'autre part. De plus, il est capable de se reproduire et de s'adapter. Ainsi, les scientifiques estiment actuellement que la vie « résulte de l'action des lois de la physique et de la chimie sur « des matériaux appropriés, si l'environnement s'y prête ». Cependant « nous ne possédons pas de vérification expérimentale », directe des hypothèses décrivant le début de la vie, même si plusieurs expériences ont permis de retracer des étapes-clé de la formation du vivant. (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019).

Avant de concevoir un lent développement de la vie par étapes et relatives à des conditions physiques et chimiques, on pensait, jusqu'au dix-neuvième siècle que la vie résultait d'une génération spontanée :

« des êtres vivants entièrement formés peuvent apparaître spontanément, généralement à partir de vase ou de matière en putréfaction (...) par génération spontanée sans l'intervention de deux parents. (...) Mais, Pasteur montra l'erreur de cette conception par une expérience et pu affirmer que : « la génération spontanée est une chimère : chaque fois qu'on y a cru, on a été le jouet d'une erreur. » » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019).

Si la vie n'est pas apparue spontanément, il est possible aussi de penser comme Arrhénius que la vie a toujours existé. Mais, cela ne répond pas à la question de savoir comment certaines formes de vie émergent et disparaissent et comment fonctionne le vivant. D'autre part, la connaissance de la formation et de l'évolution de notre planète falsifie cette hypothèse, puisque le vivant ne peut subsister que dans certaines conditions physiques très particulières. Il est dès lors possible de concevoir deux hypothèses scientifiques sur l'émergence du vivant, soit la vie émerge à partir d'autres planètes et se disperse dans tout le cosmos, « théorie de la panspermie»,

soit les composants chimiques nécessaires à son apparition proviennent d'évènements cosmiques successifs et les formes du vivant, telles que nous les connaissons, résultent d'une lente évolution. (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019).

La première hypothèse ne fait que repousser le problème de l'émergence de la vie sur cette autre planète ou ailleurs dans l'espace. Ce ne serait donc pas une explication satisfaisante. La seconde hypothèse est celle retenue et décrite par les sciences du vivant. Elle postule donc « un long processus qui a fait passer progressivement de la matière inerte aux micro-organismes en passant par des entités plus simples, par des mécanismes à préciser. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Une génération spontanée en somme, mais avec des paliers, et donc une construction par une succession de petits changements.

L'idée que la vie n'a pas toujours existé et s'est construite à partir d'ingrédients chimiques présents sur Terre vient notamment de la théorie de Darwin. Puis, en 1920, Alexander Oparine et John Burdon Sanderson Haldane, propose une théorie, appelée l'hypothèse d'Oparine-Haldane, qui a donné « les bases de la chimie prébiotique » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Cette théorie postule que la vie résulterait uniquement des lois physiques et de la chimie et notamment de l'action du Soleil, et de réactions impliquant l'eau et le dioxyde de carbone.

Ensuite, en 1953, Stanley Miller et Harold Urey procède à une expérience où les conditions primordiales de la Terre sont reconstituées selon les hypothèses de l'époque. Le résultat de l'expérience était le suivant : « du carbone initial avait formé des produits organiques, dont cinq acides aminés, mais ni sucres, ni lipides, ni acides nucléiques. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). En 2007, cette soupe primordiale reconstituée en laboratoire fut réexaminée. Le nombre d'acides aminés avait augmenté et le mélange en comportait 25.

Pour conclure : « L'expérience fondatrice de Miller et Urey nous montre qu'une atmosphère de méthane, d'hydrogène et d'ammoniac, soumise à des apports d'énergie adéquats, produit un mélange de molécules organiques simples. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Cependant, en renouvelant l'expérience avec nos connaissances actuelles des conditions primordiales de la Terre, le mélange obtient des résultats moins satisfaisants. Toutefois, il est clair que les briques constitutives du vivant ont été progressivement produites par des phénomènes physico-chimiques sur des sites aux conditions appropriées.

Aujourd'hui, les molécules nécessaires à la vie telle que nous la connaissons sont les suivantes « l'hydrogène (H), l'oxygène (O), le carbone (C), l'azote (N), le soufre (S) et le phosphore (P)

(souvent résumés sous l'acronyme – prononçable– CHNOPS) », avec, dans les proportions, une majorité d'eau et de carbone ». (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). La discipline qui étudie la chimie du vivant s'appelle la biochimie. Elle étudie les « macromolécules ou polymères », dont la quantité varie de dizaines à plusieurs « millions de monomères. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Ces macromolécules sont classées en plusieurs familles, d'une part, les glucides ou sucres, les lipides ou graisses, et les acides nucléiques, comme l'ADN, « qui contient l'information génétique » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). En outre, « les protéines et les peptides sont des polymères composés d'acides aminés », et seulement 20 acides aminés sont nécessaires à la constitution du vivant animal et végétal. (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Chacune de ces familles possède une fonction particulière. Par exemple, les protéines jouent un rôle essentiel dans les tissus, alors que les sucres permettent de stocker de l'énergie. Si chaque famille possède une fonction particulière, il faut comprendre ensuite comment ces familles interagissent.

Tout d'abord, les « monomères(...) servent de briques de bases aux macromolécules. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). D'une part, ces briques peuvent être trouvées dans « les cheminées hydrothermales sous-marines », malgré l'absence de lumière et d'oxygène, comme en témoigne des explorations au cours des années 80. D'autre part, elles peuvent provenir de comètes, comme en témoigne l'analyse de celle nommée « 67P/Churyumov-Gerasimenko » par la sonde spatiale Rosetta et par celle de la météorite tombée sur Terre en 1969, nommée « météorite Murchison », qui contient 70 acides aminés différents, « dont cinq des 20 acides aminés biologiques. » (Encrenaz, Lequeux, Casoli,2019). Une fois que nous avons ces ingrédients essentiels, il reste encore de nombreuses étapes avant qu'apparaisse la vie. Déjà, il faut que toutes ces molécules puissent se combiner. C'est là qu'apparaît l'importance du milieu.

L'hypothèse du milieu aquatique est alors rejetée, car il est considéré comme trop vaste et celle de flaque, marre ou argile est privilégiée avec des transitions en des périodes humides et sèches, notamment pour la formation des liaisons peptidiques (protides). L'hypothèse de l'argile a été confirmée par expérimentation en laboratoire pour la formation peptidique de protides. Ce milieu permettant de « catalyser la formation de l'ARN », favorise notamment la synthèse des protéines. Mais, c'est l'ADN qui contient l'information génétique à partir de laquelle sont formées les protéines. Il semble donc qu'il y ait encore des étapes intermédiaires à connaître. Il faudra donc s'intéresser notamment à la production de l'ADN. Mais, récapitulons déjà le scénario actuel privilégié par la science.

Il est postulé que la synthèse des acides aminés se soit effectuée dans les profondeurs de la croûte terrestre. Puis, le mélange serait passé par les flux hydrothermaux. Ensuite, l'émergence des cellules est postulée par l'assemblage « de monocouches de lipides (...) en structures doubles, planes puis courbes ». (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). Après, l'énergie est stockée dans les cellules grâce à un composé chimique, l'« adénosine triphosphate (ATP) », et circule quand ces liaisons sont brisées par « hydrolyse », c'est-à-dire par l'action de l'eau. (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). La vie se construirait donc par une succession de synthèses chimiques, par l'interaction entre des composés d'acides aminés et l'alternance de milieux entre la croûte terrestre, le milieu aquatique et l'argile. Le rôle de la lumière et de l'oxygène n'apparaît que plus tard.

Enfin, le métabolisme, qui correspond à l'ensemble des transformations dans un organisme, apparaît « lié au code génétique » (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). Le code génétique permet à la fois « aux cellules de se reproduire à l'identique », tout en laissant un degré de liberté nécessaire à une éventuelle adaptation (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). L'ADN, qui contient et effectue le programme génétique, serait apparu plus tardivement : « Un « monde ARN », avec une variété de proto-ARNs, aurait donc précédé le monde ADN-ARN-protéines que nous connaissons » (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). L'avantage de l'ADN, qui résulterait des mutations de l'ARN, est « la stabilité de sa double hélice, bien plus longue que les brins d'ARN, permettant la constitution de génomes de grande taille, et aussi la possibilité d'évolution grâce aux erreurs de réplication » (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019).

Ensuite, nous en venons à la question de la reproduction des organismes et à la question de filiation entre les premiers organismes et ceux que nous connaissons aujourd'hui, donc à l'hypothèse d'un ancêtre commun à tous les vivants. Or, en précisant que « le ribosome, la minuscule machine qui dans toutes les cellules du vivant fabrique les protéines, est constituée de plus de 100 000 atomes même dans les bactéries, et bien plus dans les eucaryotes », on imagine que l'arbre généalogique fut difficile à reconstituer (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019). Aujourd'hui, l'arbre phylogénique du vivant possède trois branches principales (les bactéries, les archées, les eucaryotes), et pour tronc commun « LUCA », le « Last Universal Common Ancestor », ou « dernier ancêtre commun », qui est apparu il y a sans doute « 3,5 milliards d'années » suite aux processus précédemment décrits. (Encrenaz, Lequeux, Casoli, 2019).

Pour conclure, disons que l'émergence du vivant par l'apparition d'organismes unicellulaires et pluricellulaires fut causée par des conditions physiques, chimiques, climatiques et

géologiques particulières ; particulières dans le sens où ce ne sont pas les conditions, fréquentes et normales (au sens statistique), dans l'univers, homogène et isotrope décrit en cosmologie. Un milieu tempéré, la présence de certaines molécules, une variation des états de matière et des milieux propices aux combinaisons et aux synthèses primordiales permirent à notre planète bleue d'accueillir la vie. Cette connaissance du fonctionnement du vivant permet de comprendre que n'importe quelle planète n'est pas un berceau possible de la vie et une terre habitable. L'atmosphère n'est pas respirable, ou n'existe pas, sur les autres planètes et la température y est trop élevée, ou trop faible. Nous comprenons dès lors que le vivant est lié à une composition biochimique particulière corrélative à des conditions physiques et chimiques, mais aussi géologiques initiales, comme nous avons pu l'évoquer avec ses passages dans les eaux chaudes et dans l'argile. Il y a donc une correspondance forte entre un organisme et son environnement ou milieu.

1. La diversité des formes de vie et leur filiation.

Si la biologie moléculaire décrit l'élémentarité du vivant, il s'agit ensuite de comprendre ses variations de formes. D'une part, il faut rappeler que tout le vivant n'est pas décrit par la génétique, car le niveau supérieur de description du vivant, la cellule, possède un impact dans la reconnaissance des « règnes ». Précisons aussi que la volonté de distinguer la diversité des espèces végétales et animales remonte à l'Antiquité. Les tentatives ont été nombreuses et l'apport principal arrive au dix-neuvième siècle avec Linné, qui classe les espèces autour de six catégories principales : les règnes. Or, cette distinction est justifiée aujourd'hui par la reconnaissance de différentes organisations cellulaires. D'autre part, la diversité du vivant fut conçue en termes de classes, ordres, genres, espèces et variétés. Puis, une septième catégorie, « l'embranchement », s'ajoute, et la variété a été remplacée par les « familles ».

L'embranchement est un apport de Hennig qui permet par des « clades », terme qui signifie « branche » en grec, d'articuler les espèces autour d'un lien de parenté. La qualification de l'embranchement détermine donc la spéciation. Comme pour tous les groupes, il sous-tend l'idée d'un élément commun fédérant cette diversité. Dans les arbres généalogiques, on part d'une personne et on remonte aux ancêtres en passant par les parents, puis les parents de chaque parent, etc. La diversité des branches augmente plus on remonte dans le temps avant la naissance de la personne qui construit cet arbre et donc qui en est l'unité. La construction généalogique de la famille s'effectue sur des relations horizontales (fratrie), ascendantes (parents, grands-parents, ...) et descendantes (enfants, petits-enfants...). Par ailleurs, en généalogie, il y a deux familles, celle du père et celle de la mère. Le groupe est le couple

reproducteur de l'espèce. En phylogénie, la monophylie est ce qui caractérise un groupe. Le groupe contenant cette caractéristique est nommé un clade. Il correspond à l'ancêtre commun d'une branche. Afin d'identifier cet ancêtre commun, on utilise l'ADN mitochondrial qui permet de distinguer une spécificité génétique, chez la femelle, transmise de mère en fille, et le chromosome Y, chez les mâles, transmis de père en fils. Au départ, le terme de clade fut introduit en taxonomie, puis utilisé pour le classement évolutionniste.

Comme pour l'univers, la Terre, et la vie, les espèces étaient majoritairement pensées invariantes en Occident. Il s'agit de la théorie fixiste. Au contraire, au dix-neuvième siècle, Lamarck propose l'idée de transformation des espèces basée sur des caractères acquis par hérédité. Nous voyons que l'idée a fait son chemin jusqu'à la génétique qui décrit, à travers le génome, la parenté humaine. L'intégration du facteur environnemental dans l'évolution des espèces est l'apport principal du darwinisme. Il explique la variabilité de l'espèce à partir de la notion d'adaptation. D'autres avaient pensé l'évolution et avaient tenté de l'expliquer à partir d'autres causes, notamment l'évolution en vue d'une « amélioration » de l'espèce.

Mais, contrairement aux facteurs environnementaux mesurables, l'« amélioration » d'une espèce est une valeur assez subjective. Elle est relative à la définition de ce qu'est un « progrès », selon la détermination d'une orientation. Ici, on ferait intervenir la notion de finalité mais celle-ci n'est pas directement recevable dans le contexte des explications scientifiques. Le vivant qui survit est celui qui a réussi à s'adapter à la variabilité des conditions des milieux. Pour survivre, il faut adapter son métabolisme à l'environnement en le faisant fonctionner à partir des constituants extérieurs qu'il s'agisse d'oxygène ou d'un autre composé. Par exemple, certains organismes peuvent survivre dans un milieu anoxique et sulfuré. Les notions de finalité ou de progrès n'ont pas de place en science biologique (ce qui ne veut pas dire qu'elles ont aucun sens, philosophique, par exemple). Les questions de variation, sélection adaptation, complexification suffisent à décrire la grande histoire du vivant.

Une variété de disciplines étudie les groupes de vivants d'un règne spécifique. La zoologie étudie les animaux et la botanique les végétaux. La taxonomie, elle, étudie les lois de classification autour de taxons. Un taxon est l'unité formelle d'un groupe d'organisme. Par exemple, homo est un taxon, une classe générale et les hominidés forme « un rang familial » (Lecointre, Le Guyader, Visset 2001) les dérivés ou versions d'une classe générale. La caractéristique générale, le taxon, des *homos* est signifié par l'augmentation de la boîte crânienne par rapport aux versions antérieures. Cette détermination d'un élément

caractéristique, comme l'augmentation de la taille de la boîte crânienne, est possible à partir de fouilles permettant d'obtenir des indices sur l'évolution et la diversité de formes des vivants.

En outre, il est possible d'établir une anatomie comparée des différentes formes de vie grâce à l'étude des fossiles. Nous comprenons donc qu'une diversité de disciplines est nécessaire pour comprendre le fonctionnement du vivant, au sein des diverses branches de la biologie. De fait, il existe une correspondance entre les conditions d'existence, le mode d'être, et le milieu de vie. Par exemple, les nageoires correspondent aux conditions de vie dans le milieu aquatique. Les espèces qui survivent sont celles qui sont le plus en symbiose avec leur environnement. Cette donnée fondamentale a semble-t-il été oubliée par notre espèce...

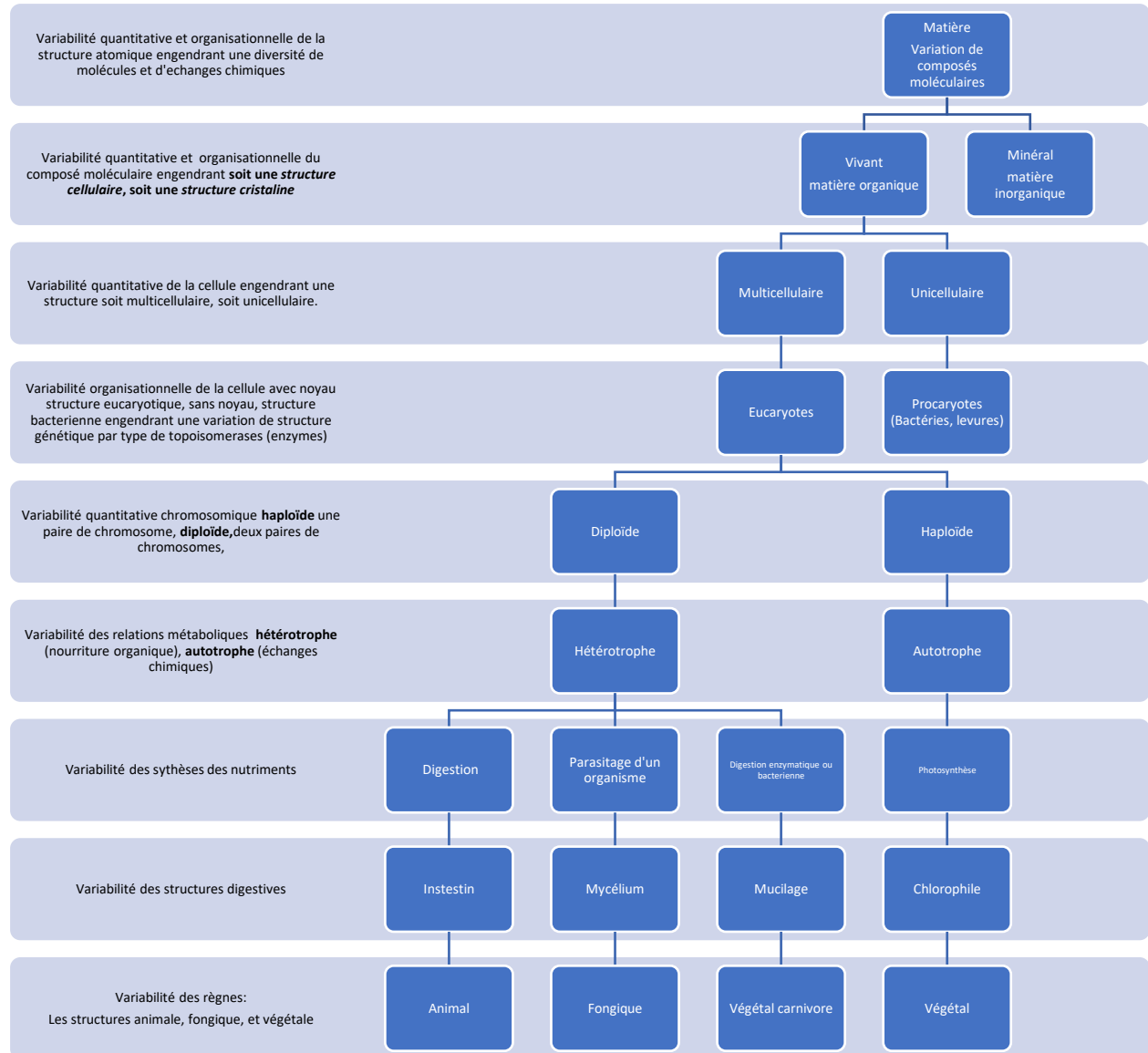
La description évolutionniste du vivant suggère une continuelle réorganisation du vivant en fonction de l'évolution de son milieu. Pour décrire cette évolution du vivant, il est possible d'en établir un récit en identifiant les éléments stables, des types d'organismes qui subsistent au moins un temps dans un même écosystème, la biodiversité. Cette diversité est signifiante par la différence de structures, pensons aux agencements de cristaux pour l'inorganique, la matière, et aux agencements cellulaires pour l'organique, le vivant. La différence des modes d'organisation de la matière permet de distinguer le minéral et le vivant.

Ensuite, il s'agit d'observer la différence structurelle de la cellule pour identifier s'il s'agit d'une cellule végétale ou animale. Il est aussi possible de distinguer les bactéries des autres espèces, notamment parce qu'elles n'ont pas de noyau cellulaire. Cela possède un impact génétique et chimique puisque ce n'est pas l'ADN, qui transporte l'information génétique, mais l'ARN. La structure des nucléotides est aussi différente.

Pour conclure, il est donc possible de décrire la diversité des formes de vie selon quatre observables : les composants, l'organisation cellulaire, le codage génétique spécifique, et l'anatomie. Ce qui est important ici c'est de remarquer que l'essentiel, pour la définition de ces formes, réside non pas tant dans les composants, les élémentarités, que dans les formes variées d'organisations (la structure de leur relations-interactions), induisant une capacité d'engendrer des fonctions (la structure produit des formes et les formes des fonctions). C'est la nature des interactions et leur topologie qui est importante pour expliquer l'engendrement des formes ou des types d'ordre et non la nature des composants. Bien entendu la nature des composants peut intervenir dans la mesure où ils sont aussi responsables des certaines propriétés des interactions mais, par exemple, des réseaux d'automates booléens (portes logiques) et des neurones biologiques peuvent reproduire certains types d'organisation les deux composants étant

fondamentalement différents. Mais notre petit survol de la biologie manifeste aussi l'importance des niveaux, des échelles d'organisation, qui chacun possède une autonomie relative autorisant dès lors une approche par des disciplines différentes.

Proposition de synthèse sur la structuration des règnes



Au niveau élémentaire de la phylogénie, on distingue les procaryotes, des organismes unicellulaires, en deux groupes : « les archaebactéries et les eubactéries » (Cooper, François, François, 1999), puisque l'oxygène est nocif pour les archaebactéries et pas pour les eubactéries, qui appartiennent à la famille des bactéries et se trouve potentiellement dans tous ce qui est vivant et le vivant à notre stade d'évolution s'alimente communément d'oxygène. L'analyse moléculaire de la cellule permet donc d'identifier la diversité des vivants et de construire des liens et des ruptures entre les espèces : « les cellules contemporaines sont issues

d'un ancêtre procaryotique commun via trois lignes ancestrales, qui ont donné les archaeobactéries, les eubactéries et les eucaryotes. » (Cooper, François, François, 1999) Les eucaryotes possèdent un noyau, alors que les procaryotes n'en possèdent pas, ou plutôt, il est confondu avec le cytoplasme. Ces distinctions selon la structuration cellulaire et la composition moléculaire permettent d'identifier la première strate de l'arbre phylogénétique du vivant avec un ancêtre commun procaryote. A partir de cet ancêtre commun une séparation en trois embranchements apparaît : les archaeobactéries, les bactéries, dont les cyanobactéries se distinguent justement par leur composition chimique, et les eucaryotes, dont sont issus les plantes, les animaux, les champignons et les protistes (les vivants unicellulaires).

Quand on observe la coupe d'une cellule animale et la coupe d'une cellule végétale, on observe plusieurs différences organisationnelles. Si les deux comportent un noyau, l'organisation périphérique est significativement différente. Déjà, le noyau est au centre de la cellule animale et excentrée pour le végétal. Les ribosomes ne sont pas non plus à la même place comme les nucléoles, les réticulums, mitochondries et autres parties des cellules. En plus des différences organisationnelles, certaines parties sont absentes dans l'une ou l'autre des cellules. Enfin, la cellule animale n'a pas de paroi cellulaire alors que la cellule végétale en a une. Cependant, la cellule animale possède des centrioles que la cellule végétale ne possède pas. La composition de la membrane plasmique n'est pas non plus la même. La cellule animale possède du cholestérol et la cellule végétale non. Les vacuoles sont petites et plusieurs dans la cellule animale, alors que la cellule végétale n'en contient qu'une grande en son centre. Le mode de stockage de l'énergie diffère également. Il est glycogène pour la cellule animale et à base d'amidon pour la cellule végétale. La nutrition est hétérotrophe pour la première, se nourrissant de constituants préexistants, et autotrophe pour la seconde, puisque le végétal élabore lui-même la chlorophylle dont il s'alimente.

La connaissance des composés moléculaires et des structurations cellulaires permet donc d'identifier la diversification des formes de vie. D'une part, les organismes unicellulaires et les organismes multicellulaires. D'autre part, les bactéries, les champignons, les plantes ou les animaux. Les outils utilisés pour parvenir à ces connaissances sont plusieurs types de microscopies optique, confocale, électronique. Parmi les expériences clé, notons celle de la culture de cellules animales qui fut améliorée par « le milieu mis au point par Eagle ». (Cooper, François, François, 1999) Ce fut une étape importante dans le cheminement de la compréhension du rôle des polypeptides « qui commandent le comportement de chaque cellule au sein de l'organisme animale. » (Cooper, François, François, 1999)

Ainsi, l'étude de la vie par l'analyse de la composition moléculaire, de l'organisation cellulaire et du codage génétique a permis un progrès épistémologique dans la compréhension de la diversification des formes de vie. La différence entre les règnes est manifeste par l'observation microscopique des divergences des agencements cellulaires permettant de distinguer au moins deux formes de vie : le végétal et l'animal. D'une part, la description du vivant par la biologie moléculaire est efficace, car elle montre deux types d'évolution métabolique possible à base d'oxygène, ou non, selon les types archaebactéries ou eubactéries supposés séparés au début de l'évolution, puisqu'une période de l'évolution chimique terrestre fut plus favorable aux premiers, à une époque, et au second à une autre. Ce modèle descriptif rapporte donc le vivant à ce qui lui permet d'émerger et de subsister : son environnement. D'une part, il est donc possible de distinguer les organismes selon des conditions de vie, biotope. D'autre part, il est possible de les décrire en fonction de leur forme, morphologie, en rapport à une structure vertébrée ou non. L'un et l'autre étant lié puisque, par exemple, les nageoires fonctionnent dans un certain milieu et pas dans un autre.

La description phylogénique permet donc de catégoriser les formes de vie en fonction de plusieurs critères « anatomiques ou physiologiques, écologiques, génomiques, etc. » (Manuel s.d) Ensuite, se pose la question de leur filiation. Dans les années 1970, le *Caenorhabditis elegans*, une sorte de lombric, est l'espèce servant de modèle, car elle est considérée comme la plus primitive. Ensuite, le séquençage du génome de cet animal en 1998 a révélé un lien avec une espèce qui semblait éloignée, celle qui a des pieds articulés, les arthropodes, que sont notamment les mouches, drosophiles, et la catégorie plus large des vertébrés. L'association de la phylogénie et de la génétique, la phylogénétique, réarticule donc l'arborescence du vivant issue de l'apparition de particularités au sein des espèces. Ainsi le nouveau modèle fonctionne sur le paramétrage tel que « Tout gène présent chez la drosophile et les vertébrés mais absent chez le nématode (une situation fréquente) devait être présent chez l'ancêtre commun de ces trois organismes », comme l'explique Michaël Manuel dans un article encyclopédique sur la phylogénie animale. (Manuel s.d)

Dès lors, en faisant le tour des animaux que nous connaissons, qui ont à la fois l'aspect d'un ver et des pattes, on pense tout de suite à la chenille. Or, les onychophores, ou vers de velours, qui ressemblent à un millepattes ont une place importante dans la description évolutive des espèces et de leur parenté. En effet, ils permettent, par leur apparence de vers et leurs pattes, de rassembler deux catégories animales distinctes les arthropodes et les invertébrés. Nous constatons donc que ces groupes sont très vastes et se construisent par l'apparition successive

de particularités. C'est pour cela qu'en observant les arbres phylogénétiques, sans connaissance préalable de son organisation, ils peuvent ne pas sembler « logique ».

Ainsi, des raccourcis basés sur des présupposés philosophiques peuvent faire naître une réduction contraire à ce que décrivent ces arbres comme celle qu'exprime la phrase « l'homme descend du singe ». On comprend que la mécompréhension de ces arbres et/ou des interprétations erronées puisse conduire à des railleries ou à des critiques. De même, la théorie de l'évolution continue de faire couler beaucoup d'encre peut-être, et surtout, parce qu'elle n'est pas comprise. A la théorie de l'évolution assez labyrinthique des espèces, s'oppose la conception hiérarchique d'une échelle des êtres avec l'humain à son plus haut échelon. Bien-sûr, cette conception est philosophique et non scientifique. Au contraire, la description biologique du vivant montre des liens de parenté dans la diversité des vivants, malgré la diversité de leur forme, et ne permet pas une hiérarchie unique et absolue. Cette description scientifique du vivant s'articule par embranchement, ou chacun « est censé être anatomiquement caractérisé par un plan d'organisation particulier. (...) le plan d'organisation représente l'architecture fonctionnelle caractéristique de l'embranchement » (Manuel s.d).

Cette logique fut conçue par Georges Cuvier, suite à un redécoupage de la classification de Linné. Cette simplification permet un classement selon quatre embranchements : les vertébrés, les articulés (correspondant actuellement aux arthropodes avec un squelette externe et articulés, et aux annélides, lombrics), les rayonnés (correspondant aux cnidaires, par exemple les anémones de mer, et aux échinodermes, comme les étoiles de mer), les mollusques. Depuis, le nombre d'embranchements a augmenté, mais la détermination de l'embranchement par le plan d'organisation subsiste. Or, nous comprenons que ce plan d'organisation est morphologique. De plus, « chaque grade se distingue du précédent par l'acquisition d'un caractère anatomique considéré comme fondamental ». (Manuel s.d). Ensuite, chaque grade supplémentaire est transmis à l'individu lors de l'embryogenèse. Enfin, l'hypothèse unificatrice procède du passage de l'unicellulaire au pluricellulaire, mais aussi par l'introduction d'un ancêtre commun de premier grade appartenant à l'espèce des éponges ou spongiaire, nommée « parazoaires par Sollas en 1884 ». Ainsi, cette transition serait récapitulée « au cours du développement embryonnaire de tout animal, par le passage du zygote unicellulaire à l'embryon pluricellulaire (processus de segmentation de l'œuf ou clivage) » (Manuel s.d). L'évolution de toute l'espèce serait récapitulée en chaque individu.

Pour conclure, la phylogénie traditionnelle des métazoaires, qui correspond au groupement d'espèces animales pluricellulaires, malgré la cohérence de sa description et les apparences ne

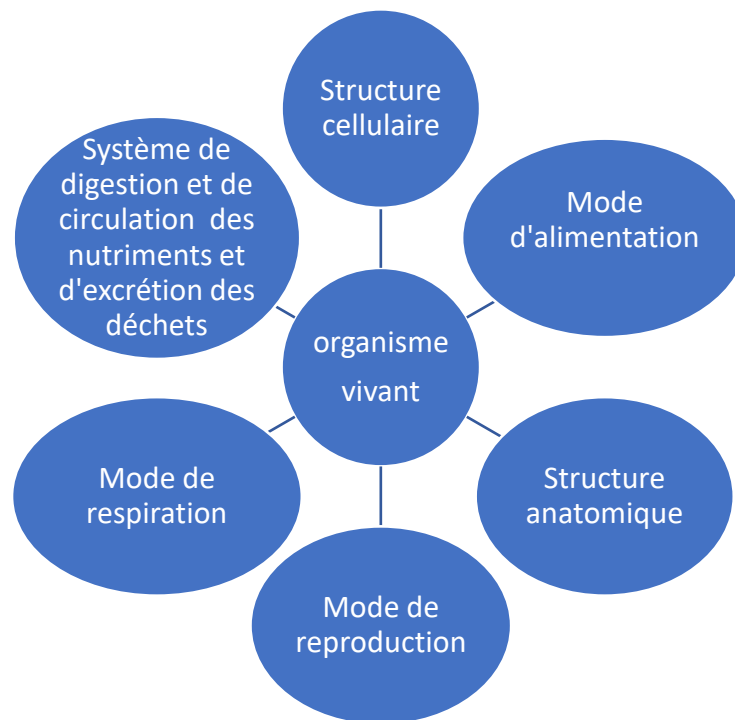
fait pas l'objet d'un consensus. Elle est à la fois « exposée sans guère de discussion dans les cours et les ouvrages universitaires », et en même temps « l'objet de critiques plus ou moins virulentes, dès son origine et pendant tout le XX^e siècle ». (Manuel s.d).

Cependant, les nouvelles techniques émergentes permettent d'apporter des données complémentaires. Ainsi, grâce à la phylogénie moléculaire, ce qui fait consensus est le fait que « les métazoaires (éponges comprises) constituent un groupe monophylétique. » En poursuivant cette voie, « l'ancêtre commun des métazoaires serait, (...) une éponge. » Toutefois, de nouvelles voies sont aussi ouvertes, notamment avec un groupement plus large, avec les Bilatériens, qui inclue l'identification par une construction d'un côté gauche et un côté droit, contrairement aux éponges. Cette hypothèse est appuyée par plusieurs analyses génomiques. La construction de la connaissance de l'arbre phylogénétique du vivant connaît donc des réorganisations. Comme, dans d'autres disciplines, où les modèles se multiplient, les formes d'arbres phylogénétiques aussi. Ce qui n'est pas étonnant car la science, elle aussi, est une entreprise évolutive.

Si on s'en tient à une anatomie comparative des organes de l'animal selon les types de vertébrés et les types d'invertébrés, on remarque de grandes similitudes. Parmi les vertébrés, on peut citer les poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux, mammifères, dont les modes de déplacement sont variés soit en nageant, en rampant, en volant ou en marchant. Parmi les invertébrés citons les mollusques, les insectes à carapaces et les lombrics, évoluant aussi dans des milieux différents. Ainsi, la distinction morphologique permet d'identifier une structure rigide, avec une colonne vertébrale ou plus souple, où la limite de l'organisme est donnée par la frontière de sa peau lui conférant une élasticité, un aspect plus fluide. En poursuivant ce type de comparaison, nous entrerions dans l'anatomie comparée qui, selon le Muséum d'histoire naturelle, « permet de confronter les caractères anatomiques sur des séries d'espèces, et de comparer ainsi les formes et les structures ».

La morphologie fonctionnelle s'attache au rapport entre des « caractéristiques anatomiques » et le fonctionnement des organes. Ensuite, il est aussi possible d'analyser « les caractéristiques du squelette en fonction des relations phylogénétiques (la phylogénèse) ». Ainsi, les formes des crânes, par exemple, sont comparées. A priori, on ne voit pas bien l'intérêt de comparer ces formes sans avoir pour finalité d'obtenir des éléments correspondant à la description phylogénique. Cependant, la description morphologique permet aussi d'identifier les facultés du vivant en fonction de ses organes. Ainsi, il est possible d'établir ce tableau récapitulatif du fonctionnement général d'un organisme vivant et de certaines variations.

Fonctionnement général d'un organisme vivant



La biosphère : la diversité fonctionnelle du vivant.										
Structures cellulaires	ANIMAL								FONGIQUE	VEGETAL
Modes d'alimentation	Hétérotrophe									Autotrophe
Structures anatomiques	Vertébrés				Invertébrés				Tige	
Modes de reproduction	Reproduction sexuée (fécondation)								Reproduction asexuée (multiplication végétative)	
	Mammifères	Ovipares			Ovipares			Hermaphrodites	Sporulation	Germination
		Oiseaux	Reptiles	Amphibiens	Poissons	Mollusques	Insectes	Lombrics		
Mode de respiration	Poumons			Branchies Poumons	Branchies		Tuburules	Par la peau	Filaments	Membranes des mitochondries et photo respiration
Fonctionnement des relations métaboliques	Système circulatoire sanguin et lymphatique								Sève	
	Système digestif et d'excrétion								Mycélium	Photosynthèse

En associant les connaissances acquises par plusieurs disciplines scientifiques, il est donc possible d'acquérir une compréhension plus complète du fonctionnement du vivant, tant sur ses composants nécessaires que sur leurs effets. Par exemple, le fonctionnement des règnes animal, végétal et fongique reste foncièrement différents, puisque les deux derniers sont enracinés entre deux milieux, la terre et l'air, alors que les animaux peuvent se mouvoir. Les quatre antiques « éléments », terre (humus), air (atmosphère), eau et énergie (feu), restent des fondamentaux pour le vivant, comme l'avait déjà souligné le père de la biologie... Aristote !

Enfin, ce qu'il faut surtout retenir de la phylogénie, dans ses divers embranchements, même s'ils sont encore mal identifiés, c'est l'émergence de particularités de plus en plus prononcées qui, au fil des mutations et des millénaires, rendent ces règnes aujourd'hui totalement différenciés, si bien que ces liens sont difficilement concevables. Le lien entre le règne végétal et animal reste le nœud le plus complexe à imaginer. Cependant, les structures particulières que sont le corail ou les éponges de mer sont peut-être un trait d'union entre ces formes de vie devenues aujourd'hui totalement différentes. D'ailleurs, signalons que Darwin envisageait la forme du corail plutôt que celle de l'arbre pour décrire cette évolution protéiforme qui prend aujourd'hui tous les visages de la biodiversité, qu'une seule espèce, la nôtre, est hélas en train de détruire, en tant que superprédateur.

Dans ce premier chapitre sur la connaissance scientifique du vivant, nous venons donc d'étudier les manières de signifier la diversité des formes de vie et leur filiation. On pourrait s'étonner que notre texte se soit attardé à une description de tous ces êtres vivants. Notre but n'était pas bien entendu de faire un cours de biologie, qui excède nos compétences, mais de suggérer que la vie est une histoire, et qu'elle est marquée de multiples bifurcations, menant au gré des adaptations aux milieux rencontrés, à une diversité de modes d'organisation qui engendre chacun des mondes vivants relativement autonomes.

Dans le second chapitre, nous allons analyser un sous-ensemble de ces catégories (végétal, animal) en fonction du type d'organisme. En effet, un végétal ne possède pas les mêmes organes qu'un animal. Nous allons donc nous intéresser au fonctionnement global des organes en abordant la question de l'émergence d'un organisme. L'émergence signifie une prise d'autonomie relative et donc une possibilité de concevoir des descriptions d'organismes pertinentes à une certaine échelle de phénomènes qui n'exigent pas nécessairement (de fait ou par principe) le recours à des niveaux plus fins de composants !

2. L'émergence d'un organisme selon les modes de reproduction.

Tout d'abord, un organisme ne se développe pas spontanément, mais par une voie reproductrice, notamment par la fécondation dans le cas d'une reproduction sexuée. La reproduction est une caractéristique du vivant. Les particules ne se reproduisent pas.³⁴ La reproduction est un trait commun du vivant qui signifie qu'un organisme croît et produit un ou plusieurs organismes lui ressemblant. Il existe plusieurs modes de reproduction, sexué ou non. La reproduction asexuée est la capacité d'un organisme à se multiplier seul, comme le font les cellules : « une partie plus ou moins importante de l'individu parent se détache et se complète pour mener une vie indépendante ». (Fizman s.d) Parmi les différents modes de reproduction possibles, on peut citer la fertilisation par les sols ou la pollinisation pour les fleurs par l'intermédiaire de l'air ou des insectes. Le mode de reproduction est donc aussi un élément permettant de distinguer différentes formes de vie. Le nombre d'organismes augmente de différentes manières et sous différentes formes. Cependant, « le trait commun aux deux types de reproduction, sexuée et asexuée, c'est que le nouvel individu se développe à partir d'une ou plusieurs cellules indifférenciées et totipotentes. » (Fizman s.d).

Les cellules totipotentes caractérisent les cellules aux premiers stades après la fécondation. A ces stades, elles sont capables de produire, par exemple, chez l'humain « un embryon entier mais également le placenta et le cordon ombilical qui l'accompagnent », ³⁵ alors que les cellules pluripotentes sont « capables de générer tous les tissus d'un organisme ». La différence entre les deux types de cellules réside dans le fait que les cellules pluripotentes, ou cellules souches, permettent de créer n'importe quel type de cellule sauf les cellules embryonnaires. Or, en 2015, l'INSERM a publié un communiqué sur la production de cellules totipotentes. Selon, l'INSERM, cette connaissance pourrait servir en « médecine régénérative », mais d'après la description, cela sous-tend aussi que cette découverte pourrait servir à la production de nouveaux embryons à partir de ces cellules, puisque l'une des techniques de clonage intervient au début de la période embryonnaire : La technique de « clonage par séparation de blastomères d'un jeune embryon (...) met à profit la totipotence des cellules embryonnaire » (Lavergne, Renard s.d). Si l'individu est par nature unique, le clonage le rend duplicable : « les clones

³⁴ Un cristal peut, dans un milieu, induire la production de cristaux similaires, mais ce n'est pas comparable à la reproduction biologique.

³⁵ Communiqué de presse INSERM, "De la pluripotence à la totipotence", sur *INSERM*, 3 août 2015 (en ligne : <https://presse.inserm.fr/de-la-pluripotence-a-la-totipotence/20082>)

possèdent bien le même ensemble de gènes nucléaires. » (Lavergne, Renard s.d). Le processus cellulaire engendre l'apparition d'un nouvel individu. Cela nécessite donc de s'y attarder un peu plus en décrivant les phases de construction d'un organisme, l'embryogenèse.

L'embryogenèse est un processus naturel qui peut se décrire en plusieurs étapes. On distingue la période embryonnaire, l'organogénèse, pendant laquelle les organes se développent, de la période fœtale, où la croissance est plus rapide et les organes se différencient davantage. L'embryogénie est divisée en 23 stades dits de Carnegie et dure 56 jours. L'embryon est alors caractérisable par son âge depuis la fécondation, sa taille et son évolution morphologique. La fécondation apparaît dès le premier jour. Les cellules commencent alors à se multiplier. Cette période est nommée segmentation ou clivage. Ce sont les premières mitoses, puis survient la formation des tissus embryonnaires. Avant de se diviser, la cellule croît, se réplique et enfin se divise. Nous retrouvons au niveau de l'individu une histoire où chaque stade évolutif correspond à des bifurcations et, d'ailleurs, à des brisures de symétrie. L'historicité produit la diversité et l'émergence progressives de structures douées de leurs propres lois : « autonomes ».

Après la fécondation, les chromosomes contenus dans le noyau cellulaire connaissent aussi tout un processus descriptible en plusieurs phases. Avant de les décrire, précisons que structurellement, le chromosome est constitué de deux chromatines. La chromatine est constituée d'un nucléosome, lui-même composé de 8 histones. Et, les histones sont des protéines, elles-mêmes composées d'acides aminés. Ensuite, décrivons ce processus, ou l'histoire des chromosomes, nommé la méiose. Il se divise en deux parties : la prophase et la mitose. La prophase désigne l'assemblage de chromosomes par paires. Pour la reproduction sexuée, les chromosomes masculins et féminins échangent jusqu'à former « une nouvelle duplication chromosomique. Cette première partie est subdivisible en cinq stades. Pendant la première, le leptotène, les chromosomes s'individualisent « sous forme de longs filaments » (Picard, Zickler s.d). Puis, le zygotène est la période où les chromosomes deviennent progressivement homologues. Ensuite, ils changent de textures et de formes en s'épaississant et se raccourcissant pendant la phase nommée pachytène. Enfin, ils se séparent, phase diplotène, et se raccourcissent encore pendant la phase diacinèse. La seconde partie de l'histoire de la méiose est nommée la mitose. La mitose « assure un partage rigoureux, entre deux cellules filles » et « la duplication du matériel génétique porteur de l'information se produit au cours de la période précédant la mitose ou interphase ». Les chromosomes se condensent. Ils apparaissent sous forme de filaments qui se « spiralisent », puis « s'individualisent en bâtonnets ». Au cours de la Prémétaphase, « l'enveloppe nucléaire se fragmente ». (Favard

s.d). Puis, lors de la métaphase, ils se disposent en plaque équatoriale et effectuent encore des déplacements lors de l'anaphase. Enfin, chaque individu de l'espèce humaine possède normalement 46 chromosomes repartis en paire, des cellules diploïdes. Les seules cellules haploïdes, dépareillée, sont les gamètes soit mâle (spermatozoïdes), soit femelle (ovules). Cette paire détermine donc le sexe de l'individu. Il y a 22 paires identiques dans une espèce et une paire qui varie selon le matériel sexuel. Cependant, l'hermaphrodisme est caractérisé par la présence d'un tissu testiculaire et d'un tissu ovarien comme l'explique un article d'embryogénie sur le site de l'université de Fribourg. A présent, zoomons sur l'intérieur d'un chromosome.

L'ADN est le constituant moléculaire entortillé des chromosomes. Il s'agit d'un composé moléculaire, d'un polymère, l'acide désoxyribonucléique. La structure de l'ADN a été décrite en 1953 par Jim Watson et Francis Crick « en s'appuyant sur les travaux de Rosalind Franklin », (Lyonnet, Lyonnet 2017) qu'il convient de ne pas oublier. L'ADN est structurée en double hélice et composée de quatre nucléotides : l'adénine, la guanine, la thymine, et la cytosine. Ce sont les combinaisons possibles entre ces quatre nucléotides qui correspondent à l'information génétique. Ainsi, deux éléments sont déterminants : des composants moléculaires, les nucléotides, constituant l'ADN, « le support de l'hérédité », (Lyonnet, Lyonnet 2017) et la diversité des manières possibles de combiner ces quatre composants, constituant l'information génétique. « Dans le génome, il y a ... des gènes, mais pas seulement. Un certain nombre des motifs jouent divers rôles biologiques », comme le résume Bernard Prum (Prum 2009). La forme en double hélice de l'ADN, constituée de deux brins, leur permet de s'enrouler. La longueur de l'ADN contenue dans le noyau d'une cellule de 6 microns, si elle était déroulée, mesurerait 1,8m. Mais l'ADN est concentré. Les protéines nommées histones procèdent à l'enroulement en celui-ci.

Le processus d'enroulement de l'ADN est aussi descriptible en plusieurs étapes, comme en fait état un article sur *les notions de base de la génétique* du laboratoire de l'INRA, Institut national de la recherche agronomique (Hayes 2000). Dans le chromosome métaphasique, la compaction est maximale. Le chromosome mesure 1400 nanomètres de large et « chaque molécule d'ADN est 50 000 fois plus courte. » En mesurant à une échelle intermédiaire de 700 nanomètres, on obtient une structure spiralée. En déroulant encore l'ADN de moitié, à 300 nanomètres, on obtient un « repliement de l'hélice en boucles ». En passant à une échelle de 30 nanomètres, on observe une « surenroulement en hélice », formant comme « un chapelet de perles. » Puis, à 11 nanomètres, on obtient un enroulement simple du « "chapelet de perles" de la chromatine (une "perle" = un nucléosome) » (Lyonnet, Lyonnet 2017). Enfin, à 2 nanomètres, on observe la

structure à double hélice. Un autre paramètre est important dans la structuration d'un organisme : l'ARN.

L'ARN est chimiquement proche de l'ADN, mais « la thymine y est remplacée par l'uracile » (Lyonnet, Lyonnet 2017) ainsi, les propriétés physico-chimiques sont différentes. Le passage de l'information génétique de l'ARN à l'ADN a été compris entre autres par Monod, Jacob et Lwoff, ayant obtenu le prix Nobel pour ces travaux, et aussi pour la compréhension de la régulation de l'expression et de l'inhibition des gènes.

Nous en arrivons naturellement au gène par la distinction entre les gènes non-codants, le génome, et les gènes codants, code génétique traduit par l'ARN. Le code génétique correspond à une petite partie de l'ADN, mais une partie essentielle, qui est un mode de réplication par « l'enchaînement des nucléotides trois à trois » (Lyonnet, Lyonnet 2017). Il s'agit donc de l'unité, séquence ou motif, qui est répétée. Ainsi, nous comprenons que, comme pour les structures cristallines, les structures cellulaires, les structures génétiques, il y a deux variables : la variabilité du composé moléculaire, le composé, et la variabilité dans la combinaison de ses composants, la combinatoire. L'encodage est donc la variable génétique. Le gène, « s'avère l'unité la plus élémentaire du génome humain »³⁶ et le génome est l'ensemble du matériel génétique. Le gène est donc « un segment du génome », (Lyonnet, Lyonnet 2017) une partie de l'ensemble du patrimoine génétique. Le gène est « l'unité biochimique de la transcription, c'est-à-dire de la production d'un ARN », (Lyonnet, Lyonnet 2017) codant ou non. La technique de séquençage d'un ADN détermine la succession des nucléotides (molécules organiques). Et, il y a quatre types de nucléotides (adénine, thymine, cytosine, guanine), dont le mode d'assemblage donne un motif : le code génétique.

La découverte de l'ADN par la génétique moléculaire et son séquençage par la génomique ont engendré le développement du génie génique. De plus, il est possible de modéliser ces processus par l'utilisation des mathématiques et de l'informatique. Ainsi, la génomique comparative utilise des algorithmes pour comparer les génomes des espèces. La diversité génomique peut apparaître lors de la réplication de l'ADN, la réplicase, par l'ARN, un complexe enzymatique. Il est possible qu'apparaissent des erreurs, « une base azotée » peut alors venir remplacer une autre base moléculaire. Cette différence moléculaire modifie donc la structure physique de l'ADN. Des coupures au niveau des brins d'ADN peuvent apparaître soit par « l'agitation moléculaire » ou l'effet de radiations.

³⁶ Id.p.11 Notons que la détermination précise de ce qu'est un gène n'est pas évidente. On peut adopter des conceptions plus ou moins larges de ce qui définit un « gène ».

Même si les anomalies ne sont pas transmises, la mutation du codage qu'elles engendrent, elle, sera transmise. Comme l'explique le professeur Jean-Claude Bergliano, « la stabilité de l'ADN est un processus dynamique, résultat d'un équilibre permanent entre la production de lésions et leur réparation (...) », soumis à une régulation qui dépend du nombre de lésions. De plus, « la fidélité de la réplication selon le type d'organisme » est permise par « un système enzymatique correcteur » (Bregliano 2021) d'éventuelles erreurs, comme une relecture. Ainsi, il y a une tendance naturelle à la stabilité de l'espèce par la transmission du génome.

Cependant, de façon aléatoire, il peut apparaître des mutations, qui n'émergent pas d'une adaptation à l'environnement, mais d'une erreur de duplication du codage génétique.³⁷ Par ailleurs, parmi les espèces qui survivent, ce sont celles dont la physiologie et la morphologie s'adaptent le mieux à leur environnement qui ont le plus de probabilités de perdurer. Enfin, en plus de comprendre ce fonctionnement du codage génétique et de ses variations, précisons qu'Axel Kahn déclarait que la finalité du génie génétique est de dépister et de guérir certaines maladies (Kahn, Lhéritier, Picard s.d). La connaissance théorique débouche ici sur une capacité d'action qui en retour de manière exceptionnelle valide cette connaissance.

Mais, la génétique ne suffit pas à rendre compte du processus d'émergence d'un organisme. Il s'agit aussi de considérer l'épigénétique, qui s'intéresse à ce qui est « au-dessus » de la génétique. L'épigénétique cherche en particulier à expliquer la variabilité des phénotypes, les caractères apparents d'un individu, morphologiques et moléculaires, puisque, par exemple, la multiplicité des « identités cellulaires ou phénotypes » est de « 200 types de cellules différentes chez l'homme » (Defossez, Kirsh, Naciri, s.d). Cette discipline postule que l'ensemble de cette variabilité n'est pas uniquement causé par le code génétique de l'individu. Elle permet aussi, comme l'écrit Joël de Rosnay, de connaître « les règles scientifiques de base qui permettent d'agir beaucoup plus rapidement sur notre corps. » (de Rosnay 2018). Or, pour comprendre ces règles, il faut observer les « acteurs » de l'épigénétique, des groupes de molécules spécifiques par lesquels se réalisent ces processus. Plusieurs éléments supplémentaires sont donc considérés en épigénétique, en plus de l'ADN.

Tout d'abord, évoquons le processus de méthylation. Comme l'explique un article intitulé Les secrets de la méthylation de l'ADN, publié sur le site de l'Université de Genève, la méthylation,

37 Cf. aussi le livre de Christian Sachse, *L'évolution biologique, un trésor de philosophie Vers une nouvelle symbiose entre science et métaphysique*, EPFL Press, 2021, sur les nouvelles variantes de théories de l'évolution. Nous y reviendrons dans une annexe.

dont le nom vient du méthyle, celui-ci désignant un radical ($\text{CH}_3 -$) dérivé du méthane (CH_4), qualifie un processus chimique enclenché par la réception d'une information provenant de l'extérieur de l'organisme et engendrant des modifications, potentiellement, sur « des millions d'endroits sur la séquence de l'ADN ». La méthylation de l'ADN s'effectue au niveau de la molécule de cytosine et ne peut donc pas être détectée sur la séquence nucléotidique car ce n'est pas la même molécule. Or, selon Michaël Weber, la méthylation de l'ADN est « un acteur-clé de la pluripotence » et « comprendre comment les profils de méthylation de l'ADN participent à établir et maintenir l'identité d'une cellule » permettrait « d'optimiser les technologies de reprogrammation cellulaire et facilitera(it) leur utilisation thérapeutique » (Weber 2011).

En plus de ces facteurs environnants l'ADN, les conséquences de l'environnement plus lointain, comme le régime alimentaire, sont considérées, car elles peuvent modifier « l'activité du génome et même orienter le devenir de la totalité d'un organisme ». (Defossez, Kirsh, Naciri s.d). En effet, ce fait est observable, notamment à travers le cas de jumeaux. Ainsi, nous comprenons par cette courte introduction sur l'épigénétique, comment elle complète la connaissance apportée par la génétique et les conséquences potentiellement thérapeutiques de l'aboutissement de ces recherches. Pour conclure, comme l'écrit de Rosnay : « Notre organisme fonctionne comme un grand Orchestre », (de Rosnay 2018) dont les musiciens sont l'ensemble des organes. Il n'y a donc pas que les gènes qui déterminent l'individu, il y a aussi d'autres objets composants l'organisme et son mode de vie. A ce propos, de Rosnay cite un passage du livre de Henri Atlan, *La Fin du tout génétique* : « Il n'y a pas seulement programmation des systèmes complexes, mais détermination et régulation par interdépendances à plusieurs niveaux : métaboliques, fonctionnels, et épigénétiques » (de Rosnay 2018).

Aussi, l'environnement est à considérer dans le développement de l'individu. Déjà, le développement embryonnaire ne peut pas s'effectuer dans n'importe quel milieu. Puis, l'épigénétique permet de sortir d'un certain déterminisme génétique engageant la responsabilité propre du comportement d'un individu en fonction de ses volontés et de ses actions, de sa part d'indétermination. Notre thèse porte sur la possibilité d'unifier les savoirs. Elle a envisagé entre autres la possibilité d'une réduction des savoirs à une discipline unique comme la physique par exemple. Mais, l'analyse que nous venons de mener ici montre combien la variété des environnements et des interactions entre une multitude de niveaux (moléculaires, génétiques, épigénétiques) font émerger une diversité de systèmes complexes marqués par des contingences d'une histoire dont le fil ne pourrait peut-être pas être restauré simplement à partir des lois décrivant les constituants fondamentaux. La physique rêve d'une description qui pourrait nier

les contingences de l'histoire et qui se bâtirait ultimement sur un seul niveau explicatif, le vivant apporte dans la biologie contemporaine un démenti à ce « rêve ».

3. **Le fonctionnement des facultés : les organes et les sens reliés au cerveau.**

Nous venons d'analyser l'émergence d'un organisme en fonction d'une diversité de processus naturels. A présent, nous allons porter notre attention sur l'importance des organes dans un organisme. Chaque organe est limité et correspond à une fonction. Cependant, précisons déjà qu'un organisme ne se réduit pas à la somme de ses organes. En effet, pour que ces organes fonctionnent correctement ensemble, il faut qu'ils soient reliés. Ensuite, l'organe est caractérisable par trois éléments : ses composés moléculaires propres, une forme singulière et une combinatoire particulière.

Par exemple, il est possible de schématiser la forme d'un poumon qui participe au fonctionnement respiratoire. L'organe est donc un élément d'un système particulier. Mais, la partie, ce système particulier, ne se réduit pas qu'à l'élément, l'organe. En effet, l'organisme possède plusieurs types de fonctionnements (le système respiratoire, le système d'intégration des nutriments et d'expulsion de déchets, etc.) et la respiration, par exemple, ne se réduit pas qu'à l'organe poumon. Le système respiratoire humain compte certes deux poumons, mais aussi des bronches, un pharynx, un larynx, des bronchioles, une bouche, un nez. Ainsi, comme les gènes et les chromosomes ont chacun leur importance, les organes ont chacun leur importance, même si l'organisme ne se réduit pas aux organes. Nous allons donc nous attacher à montrer l'importance des organes, en examinant l'un d'eux, celui qui coordonne l'ensemble, le cerveau, chez les vivants qui en possèdent. Puis, en « zoomant », nous nous attarderons à son composant élémentaire, le neurone (même si des neurones se retrouvent dans d'autres parties du corps, comme le ventre). Mais nous verrons que cela ne suffit pas à caractériser l'individu.

Le cerveau est l'organe qui centralise l'influx nerveux dans les nerfs, qui sont repartis par de nombreuses ramifications fibreuses dans l'ensemble du corps. D'une manière générale, la discipline qui étudie la diversité des tissus des vivants s'appelle l'histologie et le lien entre les organes, ou les tissus, et les fonctions est l'objet de l'anatomie fonctionnelle. La discipline qui étudie le système nerveux, dont l'organe est le cerveau, s'appelle les neurosciences et elle regroupe plusieurs disciplines. Par exemple, à l'ICM, Institut du Cerveau et de la Moelle épinière, elles sont réparties en quatre secteurs d'activités principaux : la neurobiologie

cellulaire et moléculaire, la neurophysiologie intégrative, les neurosciences cognitives et la neurologie clinique.

Comme il est expliqué sur le site internet de l'institut du cerveau, la neurobiologie cellulaire et moléculaire travaille sur la compréhension du développement normal du cerveau, les maladies neurologiques et les dysfonctionnements liés au vieillissement. La neurophysiologie intégrative travaille sur la circulation des signaux nerveux dans les neurones. « Elle s'appuie sur les propriétés d'excitabilité, de conduction et de transmission du signal (...) ». Elle traite aussi des pathologies liées à ses dysfonctionnements. Les neurosciences cognitives travaillent sur la compréhension des « mécanismes responsables des déterminants cognitifs, contextuels, affectifs et motivationnel du comportement ». La neurologie clinique fait le lien entre les théories explicatives et la pratique en testant des solutions thérapeutiques. Elle recourt aux neurosciences computationnelles qui utilisent « les mathématiques, les statistiques et la neuro-informatique » La neuro-informatique modélise par ordinateur des fonctions cérébrales. De plus, comme il est expliqué dans l'ouvrage *Neurosciences : à la découverte du cerveau*, d'autres approches interdisciplinaires existent pour comprendre le cerveau et le comportement du vivant, comme la neuroanatomie, qui étudie « la structure du système nerveux », la neurochimie, la neuropharmacologie, la psychobiologie ou la psychophysique, qui mesure « les capacités de perception » (Bear 1997).

Ensuite, il existe plusieurs méthodes d'expérimentation sur le cerveau. Il est possible de le connaître par la dissection. Mais dans ce cas, il n'est plus fonctionnel. La description sera donc réduite à ses composants. La méthode de l'imagerie cérébrale est plus intéressante, car elle permet d'observer le cerveau d'un individu à l'état actif, fonctionnel. Il est donc possible d'observer la forme, l'organisation et le fonctionnement du cerveau et de comparer les cerveaux entre espèces. Déjà, le gène homéotique programme l'aménagement des organes dans un organisme. Et, pour « la plupart des animaux, le cerveau se trouve près de l'entrée du système digestif », comme l'explique un article d'éthologie sur le site internet de l'université de Genève. En revanche, les cerveaux sont « hétérogènes ». Ils évoluent dans le temps et selon les espèces. Mais, même si les traits morphologiques sont différents et qu'ils évoluent au fil du temps, il est possible d'identifier une stabilité du « substrat neural (...) pendant de longues périodes » grâce à l'élasticité de ce tissu.

De plus, il y a une homogénéité des types de cerveau par groupe d'espèce. Pour les mammifères, les neurones « mesurent 10 à 20 μm de diamètre, (...) » et la surface corticale est (...) corrélée à la dimension du cerveau », explique un article de l'université de Genève. En outre, « le

nombre de synapses par unité de volume semble constant au travers des différentes espèces » et « il y a toujours le même nombre de cellules sous une aire donnée de surface (15 millions de neurones par centimètre carré), sauf dans le cortex visuel des primates, où il y en a le double. » Ainsi, nous voyons qu'il est possible de comparer les cerveaux de différentes espèces en fonction de la grandeur et de la quantité des composants internes, tels que les neurones, les synapses et l'organisation des divers éléments internes comme les aires, mais aussi selon leur poids.

Par ailleurs, il est possible de se demander si tous les vivants ont un cerveau. Or, les « organismes » unicellulaires et les bactéries, en ont une possible ébauche par la présence de « récepteurs sur une membrane ». Mais, bien entendu, il ne s'agit pas d'un cerveau comme tel ! Dans un article sur les neurosciences, il est expliqué, qu'à l'aide de systèmes utilisant la robotique, des chercheurs ont programmé l'ensemble des connexions possible d'un ver, le C. elegans dans un robot et le résultat montre que les types de configurations permettent déjà la locomotion³⁸. Ainsi, le but de ces travaux est de comprendre « comment le système nerveux oriente le comportement ». (Sengupta, Aravinthan 2009). Les neurones et leurs connexions sont donc des éléments descriptifs essentiels du fonctionnement cérébral, même à un stade élémentaire. Enfin, un autre facteur est à considérer : la myéline, au niveau des axones, une membrane qui les gaine et augmente « l'efficacité des systèmes nerveux des vertébrés », comme le précise un article paru sur le site internet de l'université de Genève précédemment cité.

Comme la diversité d'agencement des cellules permet de caractériser les règnes, la diversité d'agencement du cerveau est porteuse de conséquences, cette fois, dans les facultés. Nous nous intéresserons, ici, à l'organisation du cerveau humain. La première observation que l'on peut faire en regardant un cerveau dans sa globalité est une remarque sur sa forme, comme ridée, en gyrencéphalie, et creusée en son milieu, distinguant deux parties. Ces deux parties sont nommées les hémisphères cérébraux gauche et droit. Ce sont les parties les plus importantes du cerveau humain. Par ailleurs, le bulbe olfactif traite les signaux générant la perception des odeurs. Au sein d'un autre bulbe, rachidien, se trouve « le contrôle et la régulation respiratoire et cardiaque ». Il est donc vital et forme un axe entre le cerveau et la moelle épinière contenu dans la colonne vertébrale. De plus, « par sa complexité structurale, le bulbe présente des fonctions multiples » et il est un point de rencontre clé pour le fonctionnement des sensations et de la locomotion.

³⁸ Nous verrons un peu plus loin sur un exemple explicite comment un réseau booléen simulant des neurones pourrait déjà imiter la faculté de reconnaissance d'image !

De part et d'autre du bulbe rachidien se trouvent le pont et le cervelet. Le pont participe au bon fonctionnement respiratoire. Le cervelet apparaît tôt au cours de « l'évolution des vertébrés » et primitivement avec deux parties, l'une pour l'équilibre et l'autre influant sur la sensibilité. Comme celui du mésencéphale, le rôle du cervelet humain, dans son état actuel, est en interaction avec d'autres parties du cerveau et ces interactions sont décrites en termes de boucles. Toutefois, la spécificité du cervelet est d'être le maître du temps. En effet, il s'agit d'une véritable « horloge interne qui marque le temps. Il informe le cerveau des adaptations à mettre en œuvre pour initier le mouvement, l'arrêter, le répéter ou en diminuer la vitesse » comme l'explique sur son site internet l'association CSC, Connaître les Syndromes Cérébelleux (pathologies générées par une altération du cervelet). De plus, il assure « la régulation, la coordination et la synchronisation des activités musculaires de mouvements volontaires tels que la marche ou la course ». Le diencephale est la partie contenant le thalamus, qui a un rôle dans la variation entre l'état de veille et de sommeil. L'hypothalamus est en charge des liaisons entre les systèmes nerveux et endocriniens. L'épithalamus serait impliqué dans le système limbique (émotionnel) et le sous-thalamus dans le fonctionnement de ganglions. Le télencéphale est l'ensemble que constituent les parties des hémisphères et le cortex cérébral. Nous comprenons donc que chaque aire est responsable de fonctions particulières.

Le cortex donne cette forme particulière au cerveau. Au départ, il s'agit d'une « substance grise superficielle » qui « reflète la présence de neurones dits corticaux », explique Didier Lavergne (Lavergne s.d). Lors de la neurogénèse, c'est-à-dire le processus de formation du neurone, ils viennent « peupler la surface nerveuse par un processus migratoire après lequel interviendra leur différenciation ». (Lavergne s.d). Cette substance se trouve sous les méninges (membranes) et son épaisseur est un indicateur du niveau de développement psychique. Ce tissu est composé de « six couches » et englobe « l'ensemble des structures nerveuses sous-jacentes dont il opère le contrôle ». (Lavergne s.d). Il opère donc une fonction « intégratrice majeure, source de la vie consciente et de la perception de soi. » (Lavergne s.d). Par ailleurs, l'aspect plissé, dont nous avons déjà parlé, est nommé « gyrencéphale », alors que l'aspect lisse du cerveau est nommé « lissencéphale ». Les rats et les lapins ont un cerveau lisse, par exemple. Mais, dans le cas d'anomalies, certains humains peuvent aussi avoir un cerveau lisse. Cette pathologie est nommée une lissencéphalie et engendre « des anomalies du tonus musculaire (...), des crises convulsives » (Verloes 2008). Nous observons donc bien l'impact que la forme du cortex peut avoir sur le comportement.

Sous le cortex, se trouvent donc les hémisphères. Pierre Buser et Paul Laget expliquent, dans leur définition des hémisphères cérébraux, que l'association « entre les hémisphères

cérébraux et les fonctions mentales supérieures, sensation consciente, motricité volontaire, mémoire, etc. » était postulée déjà avant l'antiquité classique. Mais il a fallu attendre notre époque pour avoir des résultats expérimentaux précis, en particulier, par la méthode de l'électroencéphalogramme qui enregistre les « fluctuations de potentiels électriques ». (Bioulac, Jarry, Ardaillou 2020). L'électrocorticogramme est une description graphique de ces fluctuations, mais en apposant les électrodes directement sur le cortex et non sur le cuir chevelu. S'il est possible de mesurer ces fluctuations électriques naturelles, il est aussi possible de les provoquer par des stimulations électriques sur des parties variées des circonvolutions des hémisphères générant alors des sensations élémentaires. Ces expérimentations permettent de déterminer les correspondances entre des aires cérébrales et des aires somatiques (du corps).

La question de l'asymétrie cérébrale est posée depuis 150 ans en ces termes : « les deux hémisphères cérébraux contribuent-ils de façon identique à la mise en œuvre de la vie mentale ? » (Faure, Habib, Joannette 2008). Les neurosciences cognitives (qui se distinguent des neurosciences sociales), donnent un élément de réponse par « l'observation systématique des effets de lésions cérébrales latéralisées sur les habiletés à communiquer par le langage ». Par exemple, les troubles du langage, l'aphasie, « ne sont pas la conséquence d'une lésion de n'importe lequel des deux hémisphères cérébraux. » (Faure, Habib, Joannette 2008).

Pour décrire très brièvement la correspondance entre les fonctions cérébrales et les différentes aires du cerveau, nous synthétiserons les connaissances scientifiques transmises à travers les articles du Manuel MSD (Huang s.d) à destination des professionnels de la santé et un ouvrage de neurosciences intitulé « A la découverte du cerveau » (Bear 1997). Le cerveau humain compte six lobes, les lobes frontaux, pariétaux, temporaux, occipitaux, insula et limbique, eux-mêmes subdivisées en aires. Les lobes frontaux sont impliqués dans plusieurs fonctions cérébrales. L'activité du cortex orbitofrontal génère « les comportements adaptés aux convenances sociales ». L'aire frontale médiale, ou préfrontale médiale, active les fonctions exécutives, la motivation et les processus de décision. Il est possible de comprendre l'implication des régions cérébrales dans les fonctions, notamment par le comportement engendré, en cas de dysfonctionnement de certaines de ces aires. L'aire de Broca, ou cortex frontal postéro-inférieur gauche, est en relation avec le langage et le cortex frontal dorsolatéral en rapport avec la mémorisation. Les lobes pariétaux sont constitués du cortex somatosensoriel primaire dans l'aire post-rolandique et des aires postérolatérales du gyrus post-central.

Le premier génère des ressentis somatiques : « la reconnaissance et le rappel de la forme, de la texture et du poids. ». Le second associe la vue et l'espace, donc la perspective, et la proprioception, ressenti du schéma corporel. Ensuite, le rôle des lobes pariétaux varie selon qu'ils se situent dans l'hémisphère dominant ou non. L'hémisphère dominant est associé aux facultés langagières et au calcul et l'hémisphère non dominant à la faculté de représentation, notamment par le dessin. On peut retrouver les deux fondements des mathématiques : une faculté pour l'algèbre, dans l'hémisphère dominant et une faculté pour la géométrie dans l'hémisphère non-dominant. Les lobes temporaux sont liés notamment à l'audition, à la mémoire visuelle et aux émotions. Les lobes occipitaux sont essentiellement associés à la vue. L'insula est en correspondance avec le goût, les sensations thermiques, à la perception de la douleur (algie), et traite d'autres stimuli venant notamment des viscères. Le lobe ou système limbique est relatif aux phénomènes les plus complexes comme l'apprentissage, la mémoire, les émotions.

Toutefois, plusieurs lobes sont parfois impliqués dans la même fonction, pour la mémorisation ou les émotions, par exemple. Il y a donc des interactions, des boucles, dont l'association permet la réalisation complète de ces fonctions. Mais, ces fonctions ne peuvent être exécutées que si ces aires cérébrales sont reliées (par des nerfs) à des terminaux, des jambes, par exemple, pour la motricité, ou à des sens pour la perception. Nous allons donc prendre un temps pour décrire ces systèmes sensoriels afin de montrer aussi toutes leur complexité et essentialité dans le fonctionnement perceptif.

Initialement, la gustation permet de détecter ce qui est comestible et ce qui est toxique par le goût. L'amer est rejeté et la préférence pour le sucré serait lié au souvenir du lait maternel. Notre système gustatif ne distingue que cinq goûts dominants : sucré, salé, amer, acide et umami (terme dérivé du japonais signifiant « goût savoureux »). Notre détection des goûts est relative à la composition chimique. Le goût salé est dû à la présence de sels, le goût acide à la présence d'acides, etc. La partie de la langue stimulée varie selon le goût. Le sucré est reconnu à la pointe de la langue, alors que l'amer est identifié tout en haut de celle-ci. De plus, la langue et ses papilles gustatives ne sont pas les seuls éléments à intervenir dans la détection de l'aliment. Le palais, le pharynx, l'épiglotte, la cavité nasale sont aussi intimement mêlés à cette faculté et chacune de ces zones possède des cellules particulières. Par ailleurs, on retrouve ici le champ de la physique dans la mesure où cet effet est associé à une décharge. Ce processus est appelé « transduction ». Il s'agit d'un stimulus, lié à l'environnement, qui « provoque une réponse dans une cellule réceptrice sensorielle sous forme de variation de potentiel. » (Bear

1997). Puis, l'information sensorielle est codée dans le système sensoriel, ici gustatif, et envoyée au cerveau.

L'olfaction ajoute des odeurs aux goûts permettant d'améliorer la détection d'aliments pouvant être dangereux, des aliments avariés par exemple. Il permet aussi de détecter les phéromones produites par les glandes exocrines (substances liquides). L'organe olfactif, le nez, est constitué d'une bulbe et nerf olfactifs, d'une plaque cribriforme, de diverses cellules dont les cellules basales, de récepteurs comportant des cils aux extrémités et d'une couche de mucus. (Bear 1997). Le stimuli provoque une variation du potentiel passant des cils récepteurs au nerf olfactif, en passant par les dendrites et le récepteur olfactif, puis le signal poursuit sa route jusqu'au cerveau.

La vue résulte de la détection d'ondes électromagnétiques par un système visuel. Chez les mammifères, il est constitué de l'œil, contenant la rétine, dont les photorécepteurs permettent de « convertir l'énergie lumineuse en activité nerveuse ». Ce processus s'appelle la « phototransduction ». La rétine, à l'intérieur de l'œil, est constituée de six couches et d'une diversité de structures en forme de cônes et de bâtonnets. De plus, le reste du système visuel fonctionne « comme un appareil photo ». La pupille capte la lumière et l'ouverture de la pupille est réglée par le muscle appelé « iris », dont la couleur est variable. L'ensemble est recouvert de la cornée, transparente. La cornée et le cristallin jouent un rôle de réfraction. L'emplacement des photorécepteurs influe sur l'acuité visuelle. Les nerfs optiques sont formés par « les axones des neurones visuels » (Bear 1997). La transmission de l'information engendrant une perception visuelle consciente implique plusieurs régions cérébrales de l'œil jusqu'à l'arrière du cerveau notamment au niveau du cortex visuel primaire de chaque hémisphère.

L'audition, ou l'ouïe, est la détection des sons. Elle est générée par un système auditif dans lequel on distingue trois niveaux. L'oreille externe, proche de l'extérieur est constituée du pavillon et du canal auditif. Dans l'oreille moyenne, se trouvent les osselets, constitués du marteau, de l'enclume et de l'étrier, et la membrane tympanique. Au niveau le plus profond, dans l'oreille interne, se trouve la fenêtre ovale et la cochlée. L'intensité et la fréquence des sons sont aussi des informations codées et transmises au cerveau. Nous comprenons, par ces sommaires descriptions, que chaque sens est relatif à un système perceptif particulier avec des structures originales. Une autre structure ne donnera pas la même faculté. Par exemple, l'écholocation des chauve-souris par ultra-sons est une faculté particulière à cet animal, dont nous ne sommes pas pourvus. Et, il nous est difficile de vraiment comprendre le « vécu perceptif » associé à ce type de faculté. Voir par écholocation est comme voir en entendant...

Peut-être les non-voyants ou les sous-mariniers sont-ils les plus à même d'approcher ce « vécu », mais la différence reste capitale par le rapport au cerveau qui distingue l'humain de la chauve-souris ; et percevoir n'est pas seulement recevoir des informations mais les traiter, les constituer, ... les données des sens ne forment pas immédiatement (c'est-à-dire sans médiation) le percept.

Enfin, le dernier sens est le toucher. Il correspond aux diverses informations reçues au niveau de la peau. La professeure en psychologie Arlette Stréri souligne que « le toucher a des ramifications avec les autres sens », comme la peau recouvre tout le corps. De plus, ce sens est « lié à la proprioception (sens de soi) » qui correspond à « la perception permanente de la position des différentes parties du corps et de leurs interrelations. » (Stréri, s.d). En plus de goûter des saveurs, de sentir des odeurs, de voir des couleurs, d'entendre des sons, de toucher des textures, de ressentir sa stature, notre espèce peut se mouvoir, en partie, par ses membres, et dans son ensemble, en déplaçant son corps. Pouvoir se détacher de son substrat est l'une des caractéristiques des animaux par rapport aux végétaux, aux fongiques ou au minéral. Or, cette faculté requiert un ensemble d'éléments comme une musculature. Les informations relatives à la motricité passent par la moelle épinière, pour les vertébrés, ou par un réseau nerveux pour les invertébrés.

Pour conclure, Pierre Buser, chercheur en neurobiologie, rappelle qu'avec le déterminisme d'une description neurophysiologique ou comportementale, « on admet que tout acte moteur est déclenché par un stimulus, soit externe, soit d'origine interne » (Buser, s.d). En plus, d'une description en termes de reflexe musculaire, il ajoute qu'il faut inclure la finalité du mouvement, pour répondre à des besoins élémentaires, comme aller chercher de la nourriture, par exemple. Cela ouvre à la question des représentations mentales. Par exemple, je vais me déplacer pour manger une pomme, car je perçois cet objet comme un aliment comestible. En plus des facultés perceptives, il faut donc ajouter des facultés cognitives telle que la mémoire, par exemple, l'attention et le processus de décision en fonction d'une finalité. C'est peut-être à ce niveau que se situe un degré de liberté, en fonction de la détermination d'un choix, et de l'exercice de la volonté. Notre exposé a intentionnellement voulu suggérer la diversité et la complexité immense de toute approche descriptive et explicative de la moindre faculté biologique.

Prenons l'audition et tentons simplement d'expliquer la structure de l'oreille moyenne. Il faudra un cadre théorique qui explique l'apparition des osselets. Mais ceux-ci proviennent d'une

évolution contingente à partir de la mâchoire des reptiles.³⁹ La possibilité d'audition humaine repose donc sur les détails d'une évolution qui ne peut faire l'objet d'une explication fondée sur des constituants fondamentaux donnés a priori. Les liens imprévisibles à un environnement sont cruciaux et échappent à une théorisation du genre de celle des physiciens. Au fond, la compréhension des fonctions et des facultés mises en œuvre par les systèmes complexes tels que ceux mis en œuvre dans le vivant, nécessite par leur dimension profondément historique (contingente, bifurcation, ...) une explication non seulement déductivo-nomologique mais aussi herméneutique. Après coup, la structure de l'oreille moyenne, du cerveau, ... peut s'interpréter en faisant référence à telle ou telle capacité qui n'aurait pas pu être prédite ou calculée a priori !

Conclusion du chapitre 2.

La notion de fonction, en biologie théorique, et celle unificatrice de système complexe.

Dans ce chapitre sur la connaissance scientifique du vivant, nous avons insisté sur la diversité des disciplines nécessaires à la compréhension globale de ce phénomène complexe et particulier : la vie. Tout d'abord, nous avons mentionné des manières d'identifier la diversité des formes de vie et de les relier. Puis, nous nous sommes intéressés aux processus naturels nécessaires à l'émergence d'un organisme. Enfin, nous avons abordé la place des organes et leur lien et la centralisation des facultés au niveau cérébral. Cependant, nous avons aussi rappelé qu'un organe seul, par exemple un cerveau, ne suffirait pas. Il faut aussi un système perceptif et une stimulation des sens. Nous avons aussi mentionné le fait que les organes ne sont pas tous les mêmes pour l'ensemble des vivants et les systèmes perceptifs varient également. Il y a un fonctionnement particulier selon les fonctions (respiratoire, digestif, etc.) et une diversité de facultés (perceptives, cognitives). La faculté renvoie à la capacité de faire quelque chose et la fonction à l'utilité. La fonction possède donc une place importante en biologie où l'on cherche à comprendre à quoi sert chaque élément et comment il interagit avec les autres. Ensuite, face à la diversité des processus évoqués, il est intéressant de savoir que par l'association des mathématiques et de l'informatique, il est possible de les modéliser et ces processus sont alors nommés « systèmes complexes ». Cette notion générique peut servir à la biologie, mais aussi aux sciences sociales. Intéressons-nous donc à ce terme unificateur.

39 Cf. Dossier - Histoire évolutive de l'audition chez les vertébrés :
<https://www.podcastscience.fm/dossiers/2012/01/04/histoire-evolutive-de-laudition-chez-les-vertebres/>

Définir ce que l'on entend par le qualificatif « complexe » n'est pas immédiat. On peut dans un premier temps se représenter un système complexe comme un ensemble cohérent de composants en interaction (les interactions conférant la cohérence, l'unité). C'est le nombre particulier et la nature de ces *interactions* et non pas le nombre des composants, qui fait émerger la propriété que l'on nomme « complexité ». Un système peut être constitué d'un grand nombre d'éléments sans être complexe. Un tas de sable isolé peut comporter un grand nombre de grains mais n'en est pas pour la cause un système complexe. En revanche, un système nerveux d'un animal comportant seulement quelques neurones reliés par un nombre adéquat de synapses peut constituer un système complexe et réaliser des tâches... complexes.

Hervé Zwirn donne des propriétés caractéristiques du système complexe. Tout d'abord, le « holisme » le système pour être compris ne peut s'envisager qu'au niveau global, au niveau du tout et non pas de ses parties. Dans un tel système, ensuite, on observe des phénomènes « d'auto-organisation ». (Zwirn 2006), De lui-même le système adopte des configurations d'ordre à partir d'une situation désordonnée, chaotique, et exhibe des propriétés « émergentes ». Ces propriétés n'apparaissent qu'au niveau du système tout entier et ne sont pas détectables en analysant seulement ses composants pris individuellement. Les capacités d'auto-organisation et d'émergence confèrent au système complexe une potentialité « adaptative » et « évolutive ». (Zwirn 2006), Si on réfléchit à ces propriétés, on réalise de fait que ce sont les liens interactifs qui unissent les divers composants, les uns aux autres, qui vont donner cette unité, cette cohérence globale et toutes ses propriétés.

Plutôt que de discuter des propriétés abstraites, nous allons plutôt partir de petits « modèles-jouets » qui vont illustrer, sur des cas simples, ce que pourrait être un système complexe au sens où nous l'entendons ici à la suite de Zwirn et d'autres. Les graphiques ci-dessous représentent l'évolution prévisible et prédictible de petits réseaux d'automates booléens. Il s'agit de systèmes parfaitement déterministes (dès que vous partez d'un état initial vous arrivez nécessairement dans un état prédictible à l'avance). La référence faite aux réseaux d'automates booléens est là pour montrer qu'un ensemble d'automates simples (opérateurs logiques) mis en réseaux peut faire émerger des comportements globaux nouveaux (par exemple la reconnaissance de formes). Ceci montre donc un phénomène d'émergence ici parfaitement prédictible.

Les tableaux indiquent comment calculer l'évolution des diverses configurations de départ. Le graphe des connexions entre les automates est posé a priori : on choisit une manière de

connecter les automates, puis on calcule, en fonction des tables de vérité et de ce graphe, l'évolution des configurations. Lorsqu'on change le graphe des connexions, cela change l'évolution des configurations dans l'espace des états possibles (le graphe avec des flèches et des états attracteurs en dessous...).

Il y a diverses possibilités de connecter des automates comme c'est le cas pour des neurones : dans le graphe donné il faut non seulement voir toutes les manières de connecter les automates mais aussi bien noter que chaque automate doit toujours avoir deux entrées et deux sorties ce qui réduit les possibles. Dans le cas du cerveau (100 milliards de neurones), le nombre de connexions entre les neurones est relativement faible : 3000 à 10 000 connexions (ce qui est petit devant 100 milliards !) Ceci permet à la fois une plasticité (trop peu de connexions donnerait une rigidité : car peu d'information peut circuler pour évoluer) et une robustesse (trop de connexion conduirait au chaos : car tout rétroagit sur tout).

Ici, nous n'allons donc considérer que quatre petits composants très simples, qui sont des « automates booléens ». ⁴⁰Il s'agit de petites machines qui reçoivent deux données à leurs entrées et qui retransmettent deux résultats à leurs sorties, et qui calculent ces résultats en suivant une règle très simple correspondant à un connecteur logique. Ici, nous considérons le connecteur « ET » (la conjonction notée $\wedge$) et le connecteur « OU » (la disjonction inclusive notée $\vee$). Les règles de fonctionnement correspondent aux tables de vérité de ces connecteurs que nous rappelons ici :

Table de vérité de l'opérateur « ET »

Entrée 1 : $v(p)$	Entrée 2 : $v(q)$	Sorties : $v(p \wedge q)$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

⁴⁰ Pour une introduction succincte à ce sujet confer D. Lambert, R.Rezsöhazi, *Comment les pattes viennent au serpent ? Essai sur l'étonnante plasticité du vivant*, Paris, Flammarion, 2004, p.354-363.

Table de vérité de l'opérateur « OU »

Entrée 1 : $v(p)$ Entrée 2 : $v(q)$ Sorties : $v(p \vee q)$

1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Ce que nous voudrions montrer c'est que la mise en réseau, en interaction, de quatre opérateurs (automates) booléens, symbolisant des composants élémentaires, produit déjà des comportements émergents très intéressants.

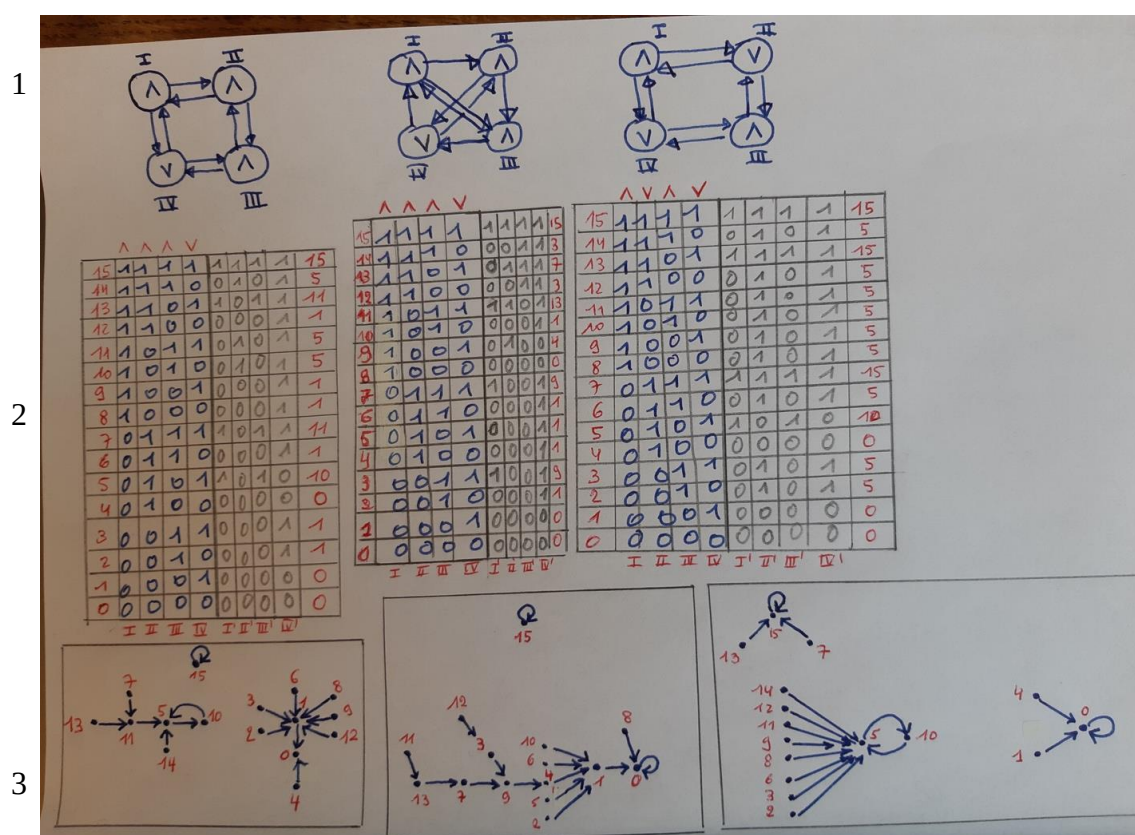
Chaque automate est supposé dans un état initial (1 ou 0). A chaque étape il reçoit une information relative aux 2 automates avec lesquels il est connecté et il recalcule son état, à l'aide de la table de vérité du $\wedge$ ou du $\vee$, puis il retransmet la valeur de cet état aux autres avec lesquels il est relié, et ainsi de suite. Nous avons calculé pour différentes connectivités (manière dont les automates sont reliés aux autres) et pour différents choix d'automates ($\wedge$ ou $\vee$) l'évolution des 16 configurations d'états possibles des 4 automates. Chaque configuration porte un numéro allant de 0 à 15 et les tableaux ci-dessous indiquent le calcul du devenir, à chaque étape, de chaque configuration (par exemple : dans le premier exemple à gauche sur la figure, la configuration « 10 » (1010) évolue vers la configuration « 5 » (0101) qui elle-même retourne vers la configuration « 10 »). Dans l'espace des configurations possibles (en bas) les flèches entre les configurations indiquent à chaque moment l'évolution des configurations. ⁴¹

Pour comprendre ce qu'est une simulation, il faut comprendre cet exemple : nous n'avons jamais utilisé aucune loi fondamentale, nous ne nous sommes basés sur aucune régularité mesurable des neurones biologiques. Ce que nous avons fait, c'est créer un petit « cerveau » artificiel (en décidant nous-mêmes comment les neurones fonctionnent : comme des opérateurs logiques : $\wedge$, $\vee$) et comment ils sont connectés (et nous pouvons faire varier cette connexion pour voir ce qui se passe : ce que nous faisons sur les dessins de gauche ou du milieu). Ce que nous espérons : et c'est le but de toute simulation c'est que le fonctionnement de notre machine (de notre réseau d'automates) va faire sortir un comportement qualitativement équivalent à ce que je vois dans

⁴¹ Confer l'annexe : les tables de vérité.

la nature, et c'est ce qui se produit ici : le réseau quoi que très simple imite (simule) un processus où à partir d'une information floutée, on peut retrouver une image connue (cf. plus loin).

Maintenant, si on avait des équations d'un modèle, on pourrait à l'inverse montrer que dans certains cas les solutions correspondent à ce que l'on avait trouvé par des simulations. Mais, souvent aujourd'hui, on n'a ni lois fondamentales, ni modèles (systèmes d'équations phénoménologiques, qui ne sont pas fondamentales, mais qui décrivent seulement des régularités observées). Et c'est le point essentiel pour cette thèse. Cette impossibilité d'appréhender des lois fondamentales ou des modélisations phénoménologiques (des grandeurs observables) dans des systèmes complexes biologiques, sociologiques, financiers, historiques, ... est peut-être justement la trace d'une irréductibilité au schéma explicatif d'une théorie du tout au sens de la physique (qui elle ne peut s'empêcher soit de recourir à des lois fondamentales, soit à des modèles phénoménologiques). Bien entendu, on pourrait changer de point de vue en physique, et soumettre que la simulation constitue, à côté de l'utilisation des lois fondamentales, une manière légitime d'appréhender la nature. Mais, cela suscitera certainement un débat ! Car modéliser avec des réseaux de machines est-ce vraiment expliquer ? Comprendre ? Ou simplement « re-produire » ? « Re-présenter » ?



Légende :

1. Trois réseaux d'automates booléens basées sur les fonctions logiques « Et » et « Ou ». Ils diffèrent par la manière dont ils sont connectés.
2. Le calcul explicite des différents états des réseaux (« états numérotés de 0 à 15)
3. L'espace des états des réseaux, les flèches, indiquent la transition d'un état à l'autre.

Il est intéressant de remarquer que ce genre d'évolution, qui émerge à partir des 4 automates, n'est pas prédictible seulement à partir de l'observation d'un automate particulier. L'émergence d'un comportement dépend du graphe des relations entre les automates, de leur connectivité. On voit que le changement de connectivité fait émerger une autre dynamique d'évolution des états. Le fait de mettre 4 automates très simples en réseau fait apparaître des comportements intéressants. On voit, par exemple, apparaître des dynamiques d'attraction vers un état qui est un point fixe, les états « 0 » dans les trois cas ou « 15 » dans le dernier cas à droite. On voit aussi apparaître des comportements cycliques (par exemple le cycle « 5-10 » qui lui-même est un attracteur : dans le premier cas à gauche les états « 7, 13, 11, 14 » sont attirés par ce cycle).

Sur ce modèle-jouet, on voit un exemple simple de reconnaissance automatique de formes. Supposons que l'image à reconnaître soit donnée par l'information binaire (pixels : le 0 désigne le blanc et le 1 le noir) : 0001 (état « 1 ») si nous partons de l'image brouillée : 0011 (état « 3 ») le système de gauche reconnaîtra (sera attiré !) automatiquement vers 0001. Mais on voit aussi qu'un système aussi simple fait apparaître des phénomènes périodiques (qui pourrait singer une « horloge biologique »).

On pourrait aussi voir sur cet exemple simplifié comment un système « complexe » pourrait s'adapter en évoluant. Par exemple, si on part de l'état « 5 », il tendra dynamiquement vers « 10 » et adoptera un comportement périodique. Mais, si on perturbe l'état de départ (par une « mutation ») et si on le transforme en « 6 », alors le système va automatiquement s'adapter et faire évoluer l'état « 1 », puis se stabiliser dans l'état « 0 ». Tous les comportements dynamiques sont liés à la connectivité globale et on voit donc ce que signifie la propriété holistique : il faut considérer tous les automates et la manière dont ils sont connectés pour pouvoir prévoir le devenir du système. On voit aussi que le système s'auto-organise : il produit une organisation, un ordre, en fonction de l'état initial dont il part.

Si nous voulons donner des exemples « naturels » de tels systèmes, on pourrait parler des neurones dans le cerveau (reliés par les connexions synaptiques), des gènes dans le génome (reliés par les réseaux de dialogue entre les gènes formés par des protéines inhibitrices ou activatrices de leurs expressions), des acteurs humains en dialogue, ... Si maintenant le système comportait des milliards d'automates reliés par de multiples connexions, on s'attend à ce que le devenir des états soit difficilement calculable (l'ensemble des configurations possibles d'un réseau de n automates pouvant prendre N états croît exponentiellement. Des questions telles que celles-ci : « soit une configuration donnée, est-on certain que la dynamique du système pourrait l'atteindre à partir de tel autre état », risque parfois d'être non-calculable (pour des raisons qui sont liées à des théorèmes profonds de la théorie de la calculabilité comme celui de « l'arrêt de Turing (*halting problem*) »). Remarquons aussi que le comportement d'un système complexe est lié bien entendu au type de fonctionnement des composants (le type de « machine »), mais d'abord et avant tout à la connectivité globale.

Stuart Kauffman, l'un des plus grands spécialistes des systèmes complexes, a bien montré cela dans son modèle nommé « NK ». Ce modèle décrit un système de N machines qui sont mise en réseau, chacune étant reliée à d'autres par K connexions. On conçoit que le type de connectivité possède une grande importance. Imaginons que $K=0$, alors il n'y aurait pas de système complexe. Il y aurait simplement un « tas » de machines juxtaposées comme les grains de sables dans un tas de sable. Le système n'a pas de cohérence, ni de dynamique propre. Imaginons maintenant que $K=N$, alors toutes les machines « perturbent », « influencent » toutes les autres et cela risque d'être le chaos total. Kauffman a montré que si K possède une valeur critique particulière, K^* , alors le système se voit placé dans un état qui est au bord de l'ordre et du chaos (entre la fixité du cristal et le chaos de la fumée, comme l'eût dit Henri Atlan (Atlan 1979)). C'est pour cette valeur de K^* que les phénomènes complexes sont les plus intéressants, car c'est dans ce mode de fonctionnement que les propriétés adaptatives, évolutives, propres à la complexité apparaissent.

Remarquons que si l'on considère le cerveau et ses petites machines en interaction, les neurones, il y a environ $N=100$ milliards de neurones, mais chaque neurone est relié à seulement 3000 à 10.000 autres. L'ordre de grandeur de K est donc situé entre 0 et N , ce qui donne au cerveau les propriétés d'émergence et d'auto-adaptation qu'on lui connaît. Remarquons aussi que dans ces conditions, les systèmes complexes se caractérisent aussi par une grande « plasticité », car ils sont à la fois robustes (il y a de la connexion qui maintient la cohérence) et malléables (il n'y a pas trop de connexions). Dans un système complexe, contrairement à un

système simple, il y a, au niveau global, un grand nombre d'interactions entre les composants, mais il ne faut pas qu'il y en ait trop !

Le cas $K=0$ peut être vu comme un état cristallin : il a un ordre parfait mais il n'y a pas de dynamique. Le cas $K=N$ peut être vu comme décrivant le chaos. Lorsque nous évoluons de $K=0$ à $K=N$ nous passons par une transition entre l'ordre et le chaos et c'est à cette transition avons-nous vu que se passent les phénomènes les plus intéressants dans les systèmes complexes (émergence, évolution, auto-organisation). Ce genre de situation, de transition de l'ordre au chaos, a été étudié dans le cadre de la thermodynamique des systèmes loin de l'équilibre par Ilya Prigogine. Les structures dissipatives, qui ont rendu ce dernier célèbre et lui ont valu le Prix Nobel, sont des structures qui s'auto-organisent à partir du chaos (Prigogine 1982). Le fait que l'ordre puisse émerger du chaos est l'un des résultats les plus intéressants et significatifs pour le philosophe qui s'intéresse à la théorie des systèmes complexes (vus à la manière de Prigogine ou de Kauffman). Cependant, les systèmes complexes possèdent aussi des limites car « simuler n'est pas comprendre », puisque reproduire n'est pas comprendre. Et c'est justement là que se pose le problème aujourd'hui : nous sommes devant des systèmes (physiques, biologiques, technologiques), dont nous pouvons que reproduire les propriétés par simulation mais sans pouvoir les expliquer en profondeur par des lois.

En fait, il y a trois niveaux de compréhension d'un système :

a) comprendre en dérivant mathématiquement les propriétés à partir de lois considérées comme fondamentales et révélant quelque chose de la structure du réel (par exemple comprendre la trajectoire de la lune à partir de la loi de Newton de la gravitation universelle). Les principes sur lesquels se fondent les lois apportent ici une compréhension des propriétés.

b) comprendre en modélisant (en créant un modèle au sens des physiciens ou des ingénieurs): Nous ne connaissons pas les lois fondamentales qui permettraient de comprendre l'apparition de certaines propriétés. Néanmoins, nous pouvons écrire des équations exprimant des relations entre des grandeurs observables et mesurables (j'ai par exemple accès à la masse des corps, à leur vitesses, à la pression ambiante,...)

c) comprendre en simulant : ici, nous n'avons pas de lois fondamentales, et nous ne voyons pas non plus comment écrire des équations reliant les grandeurs observables : je crée une "machine informatique" (et un algorithme) : un réseau d'automates en interaction, un réseau de neurones, ... dont j'espère que les résultats donneront des phénomènes observables. Par exemple,

supposons que nous ne savons rien des mécanismes de la reconnaissance des formes par le cerveau. Partant du fait que le cerveau est un réseau de neurones, nous construisons un réseau de neurones artificiels (qui sont des machines logiques qui n'ont que très peu de ressemblance avec les neurones biologiques) et nous regardons ce qu'il en sort. Si nous reproduisons la reconnaissance de formes alors nous considérons que notre simulation est satisfaisante. Si nous regardons le réseau booléen à gauche sur notre figure, nous voyons, par exemple (voir les dessins) que si nous identifions les configurations du réseau à des images : 3 par exemple correspond à 0011 qui peut être vu comme une image avec deux pixels blancs et un pixel noir. Nous constatons que beaucoup de configurations convergent vers une seule image. Les configurations 2 = 0010 ; 3= 0011 ; 4= 0100 ; 8= 1000 convergent vers 0= 0000. Cette convergence automatique est justement ce qui est exploité pour simuler la reconnaissance d'une image mémorisée à partir d'une image « floutée ».

15=1111= image avec tous les pixels noirs

0= 0000= image avec tous les pixels blancs (l'image à reconnaître).

1= 0001= une image particulière : l'image à reconnaître mais floutée.

9= 1001= une autre image encore plus floutée.

A partir de l'image floutée de départ 1001 (perçue par les sens) le système va converger vers l'état "0": 0000 c'est-à-dire il va reconnaître ou retrouver l'image à partir d'information floutée. Un peu comme si je vois quelqu'un qui a changé de coiffure ou qui est caché par une autre personne je peux quand même le reconnaître. Cette convergence progressive des états de départ (considéré comme des images approximatives) vers l'état 0 simule (ou oriente) la manière dont le cerveau reconnaît une image (un visage...) à partir d'images brouillées, cachées, floues, ...

Mais, on voit bien que la reproduction qualitative du processus de reconnaissance de forme n'est ni une compréhension (il n'y a pas de loi fondamentale. Il s'agit seulement d'une reconnaissance en fonction de données initiales), ni d'une modélisation (car en fait on ne se base pas sur des régularités biologiquement mesurables, des invariances). Il s'agit d'une simulation : autrement dit d'une recreation de la réalité dont le critère de vérité est seulement la reproduction de certains traits, de certaines propriétés de la réalité par une machine. Le plus bel exemple de cela est le livre de Wolfram, *Un autre type de science* (Wolfram 2022) : par des réseaux d'automates Wolfram essaie de reproduire (de recréer) les formes que l'on trouve dans le vivant ou les formes des écoulements de fluides, ... mais sans l'aide de lois « fondamentales » (par exemple, les équations de Navier-Stokes des fluides), ni en reliant entre elles des grandeurs mesurables (modélisation).

Le gros problème de la science des systèmes complexes est que leur compréhension semble ne pouvoir passer que par la recréation (simulation). Cela pourrait s'interpréter (i) soit comme une limite : si on songe à une réduction de toute explication à la physique et l'exigence d'expliquer tout par des lois fondamentales ; (ii) soit comme le signe de l'impossibilité de pouvoir tout réduire à la physique : dans les systèmes complexes, historiques... On ne peut avoir de loi prédisant le devenir de ces systèmes. On ne peut qu'a posteriori chercher à les reproduire... C'est là un point important ! Un des signes de l'impossible réduction du « tout » à la physique est justement l'impossibilité de trouver pour tout champ de phénomènes des lois universelles fondamentales. L'omniprésence des simulations en neurosciences, par exemple, pourrait être un autre signe de cette impossible réduction.

Dans ce sens, Zwirn a fait remarquer aussi que si j'observe certains phénomènes émergents, le comportement d'une cellule, par exemple, ou celui d'un vol d'étourneaux ou d'un banc de poissons, je peux très bien ne pas pouvoir l'expliquer facilement à l'aide des lois fondamentales de la physique (Zwirn 2006). Par contre, je peux essayer de le reproduire par une simulation utilisant des automates. Il s'agit d'un changement épistémologique important qui vient soutenir ce que nous essayons de défendre dans cette thèse. En effet, il pourrait bien se faire que l'explication classique, entendue comme une déduction à partir de lois « ultimes » décrivant un niveau fondamental constitué d'entités élémentaires, ne soit pas possible (par principe : limites de la calculabilité ou impossibilité de trouver de telles lois).

La notion de compréhension deviendrait ici, la simulation (reproduction des phénomènes à une échelle donnée) à partir de systèmes de composants en interaction (supposés exister à des échelles inférieures, mais pas nécessairement ultimes). Nous devrions quitter ici le modèle unificateur de l'explication déductivo-nomologique (qui a fait recette en physique classique par exemple ; les lois de Newton servant à l'explication de la mécanique céleste en étant le paradigme) pour un autre modèle : celui de la simulation, lorsque les systèmes comprennent des composants nombreux et en interaction. L'unification de l'explication des phénomènes relevant de divers domaines et de diverses échelles (particules, cellules, organismes, foule, ...), et décrit par des disciplines relativement autonomes ne reposerait plus sur la notion de loi fondamentale (inaccessible ou inexistante par principe ?), mais sur un mode d'explication qui recouvrirait tous ces systèmes complexes : l'explication par reproduction du phénomène par simulation. Remarquons que la simulation donne des résultats étonnants pour reproduire des comportements complexes. Cependant, nous n'avons pas donné le moindre argument prouvant

que par principe une explication par des lois et équations physiques fondamentales ne serait pas possibles.

C'est ici que les travaux de Stuart Kauffman, qui est médecin et biologiste théoricien sont extrêmement intéressants pour notre propos. En effet, il a contribué à donner des arguments techniques expliquant pourquoi la connaissance en biologie ne pourrait pas être réduite à celle de la physique. D'une part, Kauffman ne dit pas que certains phénomènes intéressants pour le biologiste ne peuvent pas être décrits par la physique. En effet, il admettrait aisément que l'application du modèle de Turing (décrivant la diffusion et la réaction de certaines substances) (Murray 1989) est importante pour expliquer l'apparition de certains patterns sur les peaux des mammifères par exemple, ou que l'application de l'hydrodynamique des fluides viscoélastiques peut être utile pour décrire les mouvements des cellules dans les premiers stades du développement de l'embryon. D'autre part, Kauffman ne sombre pas dans un vitalisme qui ferait intervenir en biologie des éléments d'explication qui relèveraient d'une philosophie de la nature (« l'élan vital ») et non pas d'une science empirico-formelle. Les arguments de Kauffman relèvent des limites scientifiques d'une science (en l'occurrence ici la physique).

Son premier argument concerne la diversité de caractérisation de la notion de fonction. Selon Kauffman la physique ne peut par elle-même prédire l'émergence de nouvelles fonctions. Pourquoi ? Définissons d'abord la notion de fonction. Pour Kauffman la fonction X d'un sous-système Y dans un système Z est le sous-ensemble des conséquences causales de Y contribuant au maintien de Z dans son existence. Par exemple, la fonction du cœur (Y) dans l'organisme humain (Z) est de pomper le sang (X). Cependant, cette fonction X n'est liée qu'à un sous-ensemble des conséquences causales de Y. En effet, le cœur (Y) par exemple peut faire du bruit, peut provoquer l'agitation de fluides dans le péricarde, ... mais ces effets ne font pas partie de la fonction du cœur (Y) dans l'organisme (Z) qui est de pomper le sang (X).

La physique décrit toutes les conséquences causales, mais elle n'a pas, en elle-même, un critère qui lui permettrait a priori de prédire l'émergence d'un sous-ensemble particulier, c'est-à-dire d'avoir un critère qui lui permettrait d'extraire a priori un sous-ensemble de conséquences causales significatives pour un organisme Z. La biologie donne sens à des fonctions en relation avec des totalités, des organismes Z. Pour le biologiste, la fonction « compte », a un sens particulier, tandis que comme Kauffman le dit très bien, pour le physicien « rien ne compte » (Kauffman 2021). On aurait envie de dire plutôt « tout compte », puisque le physicien envisage l'ensemble de toutes les conséquences causales de Y (les vibrations du cœur, la manière dont il agite des fluides du péricarde aussi bien que sa capacité à pomper le sang). Mais si « tout

compte » pour lui, en fait, il ne possède pas le critère de choix, la raison de se restreindre a priori à tel ou tel sous-ensemble. Autrement dit, la notion de fonction ne peut être définie comme telle en physique. En revanche, elle est centrale en biologie. Celle-ci ne peut donc être réduite à celle-là.

Son deuxième argument concerne les « exaptations » ou « préadaptations darwiniennes ». Il s'agit du changement de fonction de sous-systèmes au cours de l'évolution. Kauffman cite l'exemple des plumes qui servaient à la thermorégulation et qui servent ensuite au vol, où les osselets de l'oreille interne (qui participent à la fonction d'audition) qui ont évolué à partir de la mâchoire d'un poisson primitif (et donc servaient à la fonction de nutrition). Kauffman soutient que la physique ne peut prédire ce genre d'exaptation, car ce à quoi servira un sous-système Y doué d'une fonction X dépend d'un organisme futur Z qui n'est pas encore apparu au moment où Y apparaît. Mais le problème c'est que l'on n'a aucun moyen de prédire l'apparition de Z. Pourquoi ? Kauffman en illustre la raison avec l'image d'un tournevis. Le tournevis est apparu pour visser des vis ! Mais on peut l'utiliser pour maintenir une fenêtre ouverte ou pour soulever un meuble, ... Il y a une grande variété d'usages possibles du tournevis qui dépendent de l'environnement futur dans lequel il se trouvera. Son usage sera reconverti en d'autres, en fonction des situations. Mais il n'existe aucun algorithme, aucune loi générale permettant de prédire les usages futurs du tournevis... Comme le dit Kauffman, il n'y a pas une « infinité » d'usages possibles, ceux-ci sont indéfinis, non-définissable a priori (à partir du seul tournevis !).

La situation que nous venons de décrire montre, qu'en biologie, on se trouve souvent dans des situations où l'on ne peut pas prédire ce qui va se passer, et ce qui est possible de se passer. L'ensemble des possibles n'est pas défini. Il n'est donc pas possible d'associer à la situation une mesure de probabilité, aucun calcul probabiliste ne pourrait donner prise sur ce genre de situation. Comme le dit Kauffman, ce sont des situations « impréconcevables » (unprestatably).

La possibilité d'utiliser une loi mathématique permettant de prédire l'apparition d'une fonction exaptée X dans un organisme Z n'est pas possible car il n'y a pas d'invariant caractéristique ou de variable connue qui pourrait être associée à X. Comment trouver les bonnes variables qui permettraient d'écrire une loi prédisant le prochain usage innovant d'un tournevis en fonction dans une diversité de contextes indénombrable ? Il faudrait pour que ce soit possible, que l'on ait une prise sur toutes les caractéristiques expliquant l'émergence et l'évolution des environnements (dans lesquels X pourrait servir à Z).

Pour que la physique fonctionne, il faut que l'on ait prise sur l'ensemble des possibles. Un exemple est celui de la sélection de notre univers à partir d'un espace d'univers possibles. Si on considère que l'univers a émergé à partir d'un état consistant en la superposition d'un grand nombre d'univers possibles, il faut disposer d'une description de cet espace des univers possibles. Si le possible n'est pas connu, la physique ne peut rien. Mais la biologie s'intéresse justement à ces exaptations qui sont des possibles, impossibles à prédire a priori.

Un dernier argument qui est lié à celui-ci est le fait que l'ensemble des possibles dépasse largement l'ensemble des états réalisés. Par exemple, il y a 20^{200} protéines comportant 200 acides aminés (choisis parmi les 20 possibles), ce qui fait environ 10^{260} , mais il n'y a que 10^{80} particules dans l'univers. Donc, selon Kauffman, les protéines réalisées ne sont pas celles qui correspondraient à des situations statistiquement fréquentes ; situations dans lesquelles l'univers se retrouverait fréquemment, car il aurait exploré toutes les situations possibles. En fait, l'univers n'a pas la possibilité d'explorer tout l'espace des possibles. On se trouve dans ce que Kauffman appelle, avec la mécanique statistique, un système non-ergodique ⁴².

Un système ergodique est un système qui explore tout l'espace de ses états possibles en un temps raisonnable pour nous. Un exemple de système ergodique est celui d'un gaz qui atteint son équilibre thermique dans une bouteille. Dans un système non-ergodique, on n'a pas de moyen de savoir vers quel état va évoluer (presque sûrement) le système. C'est le cas des systèmes « historiques ». L'évolution de ces systèmes est liée à une infinité de fluctuations qui toutes peuvent déterminer des devenirs très différents. L'espace des possibles n'est pas déterminable. On ne peut avoir de loi mathématique du devenir de l'histoire mais, de plus, on ne peut même pas savoir ce qu'est l'ensemble des histoires possibles tant celui-ci est indéfini. L'histoire humaine pourrait dépendre de l'action totalement irrationnelle d'un personnage singulier déclenchée par l'irruption d'une situation extrêmement rare, elle-même liée à des concours de circonstances infiniment improbables.

La physique n'a pas de prise sur ce genre de prédiction, car il n'existe aucun invariants et variables caractéristiques de ce genre de situations et donc aucune loi possible et aucune statistique envisageable, puisqu'on n'a pas de prise sur l'espace des configurations possibles. Cependant, la biologie peut, quant à elle, décrire et donner sens a posteriori à ces évolutions en

⁴² Pour une définition de l'ergodicité en mécanique statistique, cf. P. Castiglione, M. Falcioni, A. Lesne, A. Wulpiani, *Physique statistique. Chaos et approches multiéchelles*, Paris, Belin, pp. 97-123. Une bonne introduction au théorème ergodique en lien avec la théorie des groupes peut être trouvée dans le livre déjà ancien mais pédagogique sous la direction de Théo Kahan, *Théorie des groupes en physique classique et quantique*, Paris, Dunod, 1971, pp. 233-280 (chapitre : « Théorie des groupes et théorie ergodique », écrit par R. Jancel).

faisant référence à l'émergence de systèmes Z qui vont donner sens aux fonctions X de sous-systèmes Y. La biologie est une science historique, elle donne sens à une évolution. La physique ne peut avoir de prise sur ce devenir possible mais a priori indéfini, comme elle est incapable de donner sens a priori à ces sous-ensembles de conséquences causales qui définissent les fonctions. Nous nous trouvons donc face à deux modèles explicatifs différents : l'un explique des interactions de causalités générales, la physique, l'autre explique des fonctions en rapport à un environnement particulier, la biologie. Ainsi, on saisit ici l'importance de la réflexion de Kauffman, car ce dernier fournit des arguments internes à la démarche scientifique pour donner une pertinence à la différence entre la physique et la biologie et à l'irréductibilité de l'une à l'autre. Comme il le montre éloquentement : il y a bien un monde (scientifiquement pertinent) au-delà du monde de la physique !

La description que donne la biologie de la vie repose entièrement sur des macromolécules : leurs réseaux d'interactions (avec toute la richesse de leurs topologies), leurs conformations (les "formes" qui vont rendre possibles, au fil de l'histoire évolutive, les diverses "fonctions"). Ces macromolécules et leurs réseaux peuvent être décrits par la chimie, par la physique, par la théorie des graphes, ... Mais c'est cela qui est important pour notre propos : même si les substrats peuvent faire l'objet d'une description physique (et physico-mathématique), ce n'est pas pour cela que cette description est suffisante pour expliquer, prédire ou rétro-dire (prédire à partir du passé ce qui se passe aujourd'hui !), les détails singuliers (historiques) du phénomène vivant.

Une science du vivant doit se fonder sur une description physique et chimique de systèmes complexes de macromolécules en interaction (génomomes, protéomes, glycomes,...), de cellules en dialogue (les cellules étant des complexes de macromolécules!), mais cette description nécessaire n'est pas suffisante, même scientifiquement. La science "synchronique" (considérant les systèmes à un moment donné) décrivant avec force un substrat formés de constituants élémentaires doit s'allier à une science "diachronique" (donnant du poids aux événements singuliers de l'histoire).

Épistémologiquement, ce qui se joue ici, c'est la question de l'oubli, ou la mise entre parenthèses, des aspects contingents ou proprement historiques, qui sont centraux en biologie et partant en anthropologie... En fait, ces aspects étaient aussi importants en physique ou en science de l'ingénieur (l'apparition de telle fissure particulière, de tel défaut singulier, à tel endroit de matériaux soumis à des contraintes révèlent de tels aspects), mais ils ont été considérés souvent comme périphériques, l'explication fondamentale se devant d'être anhistorique!

Bien entendu, des physiciens comme Prigogine ou comme Théodore Vogel ont attiré l'attention sur la prise en compte importante de l'historicité (des systèmes héréditaires...) en physique et en sciences de l'ingénieur, mais leurs messages sont souvent restés marginaux ou peu écoutés. (Vogel 1965). Mais en biologie, on ne peut plus considérer ces aspects comme périphériques, car ils sont une part essentielle de la compréhension de ce que le vivant est ici et maintenant. Si l'on veut comprendre aujourd'hui le fonctionnement de notre audition, il faut remonter à des processus évolutifs marqués par des contingences auxquelles on ne peut donner sens (herméneutique !) qu'a posteriori. Les sciences de l'humain vont bien entendu renforcer cette nécessité d'une science herméneutique et historique.

CHAPITRE 3.

Les sciences de l'esprit : les processus d'individuation.

Introduction du chapitre 3.

De l'individuation biologique à l'individuation psychique et historique.

Dans la partie sur la diversité des sciences empirico-formelles, nous avons évoqué l'apport et les limites des sciences de l'univers, et celles de l'idée d'un « tout physique », dans le premier chapitre. Puis, dans le second, nous avons décrit, le vivant, qui apparaît comme un domaine particulier résistant à une résorption dans une totalité envisagée uniquement du point de vue de l'unification physique. Nous avons considéré également son fonctionnement qui renvoie à un système complexe comportant plusieurs contraintes propres et fonctions émergentes. Nous avons vu également les limites d'une description par des systèmes complexes.

A présent, dans ce troisième chapitre, nous allons analyser un autre domaine résistant à la totalisation « seulement » physique : la pensée, qui pourrait apparaître, à son tour, comme étant « seulement » une partie de ce monde particulier qu'est le vivant. Le sujet est vaste. Il faut donc le cerner. Nous voulons montrer l'apport et les limites du tout neuronal, en notant que la pensée est relative à la construction de représentations mentales, qui ne relèvent pas « seulement » d'une combinatoire de neurones. En effet, pour que les représentations mentales se construisent, il faut aussi un système sensoriel qui renseigne sur la corporéité et sur l'environnement. Il faut aussi un système immunitaire qui permette de signifier le « soi », l'individualité biologique, et tout ce qui est hors de soi : l'altérité.

Ce chapitre vise donc à décrire les conditions nécessaires à la construction d'une individuation psychique. Tout d'abord, nous aborderons le fonctionnement neuronal de la conscience, puis la

notion de représentation mentale, et enfin, la construction identitaire. L'identité se construit en fonction des relations avec autrui. Mais qui est l'autre ? L'autre est celui dont on ne saisit pas la manière d'agir ou de penser, parce qu'on identifie une divergence de comportement en fonction de motivations différentes. L'altérité peut être culturelle, le mode de vie privée et d'expression étant différent, ou sociétale, selon la variation des normes du vivre ensemble. Mais l'altérité peut aussi et avant tout être naturelle...

Le philosophe Quentin Hiernaux, qui a soutenu sa thèse sur l'individualité du végétal, écrit que « l'animal est l'autre de l'humain, la plante est l'autre de cet autre » (Hiernaux 2021). Ce philosophe a aussi rassemblé et traduit plusieurs textes dans l'ouvrage Philosophie du végétal, dont l'analyse d'Ellen Clarke. Cette dernière y souligne que la caractérisation de l'individualité biologique est liée à l'immunité, selon ce que relève le philosophe de la biologie Thomas Pradeu. Ce qui n'est pas soi est rejeté, et tout ce qui n'est pas rejeté est donc possiblement intégrable à l'organisme.

Cette conception renvoie donc à la notion de limite de ces domaines « spatialement délimités et/ou localisés » (Hiernaux 2021). La localité de l'individu est sa corporéité (incluant son cerveau). Cependant, une personne peut être présente « sans être là », car elle peut ne pas être consciente ou attentive à ce qui l'environne. Ainsi, la localité interroge nos manières d'habiter le monde. A ce propos, une conception non anthropocentrée est décrite dans l'ouvrage Habiter en oiseau (Despret 2019). La philosophe, psychologue et ethnologue Vinciane Despret y évoque notamment le lien profond entre le « soi » et l'environnement : « l'oiseau possède son territoire, parce qu'il est possédé par lui. » (Michel 2021)

Ainsi, les individus possèdent à la fois une part de détermination, leur corporéité et leur fonctionnement, et une part d'indétermination, l'histoire de leur vie en fonction d'une multitude de degrés de liberté.

- a) La détermination est signifiée par les limites et caractéristiques naturelles : une particule ne se comporte pas comme une fleur, une fleur ne se comporte pas comme un lapin et un lapin ne se comporte pas comme un humain. Il y a différents modes d'être au monde. Ensuite, ces limites conditionnent l'ensemble des degrés de liberté possibles : celui des végétaux est moindre que celui des animaux, et celui des animaux est moindre que celui des humains, du point de vue du nombre et de la variété possibles d'actions.
- b) La part d'indétermination, face à ce plus grand nombre de possibles, fait que les histoires de

vie des animaux sont donc plus riches de diversité que celles des végétaux, et celles des humains, potentiellement, encore plus variables et diverses. Mais les végétaux sont aussi « sensibles » en un certain sens. En privilégiant la rationalité, l'humain a peut-être négligé cette sensibilité commune aux différents vivants et ce lieu commun de vie, la Terre, que ces vivants habitent.

Partant de ces considérations, une éthique du végétal est pensable et celle-ci est esquissée dans la dernière partie de l'ouvrage *Philosophie du végétal*. Le végétal y est pensé au-delà de ses utilités pour les autres vivants. Nous n'en discuterons pas ici puisque ce n'est pas notre sujet. Ceci soulève néanmoins la question de l'usage que nous faisons de notre liberté, de cette part d'indétermination, qui caractérise le comportement humain et qui peut affecter nos semblables et les autres vivants « sensibles », mais aussi de ce que nous faisons de nos savoirs. Ceci sera l'objet de notre dernière partie sur la question des fondements et des finalités. De plus, paradoxalement, le végétal peut être un modèle des rapports à autrui. En effet, il produit lui-même sa nourriture et peut contribuer à la vie d'autres vivants. Il est en effet possible de mettre en évidence des relations inter-espèces qui ne sont pas que prédatrices ou nuisibles (parasitisme). Il est possible de considérer les autres vivants soit dans un lien globalisant d'interdépendance (symbiose), soit dans un rapport altruiste, qui profite à l'un et à l'autre (mutualisme), soit en ayant un profit qui ne nuit pas à l'autre (commensalisme). Dans une perspective de développement durable, un tel comportement mutualiste semble nécessaire à mettre en œuvre.

Enfin, pour traiter de l'activité psychique, nous verrons qu'une autre notion incontournable s'impose, celle de « représentation mentale ». Une représentation mentale émerge d'une association entre la détection d'un stimuli extérieur à un organisme et une interprétation de cette information en fonction du mode propre de réception et d'une base de données interne. La représentation mentale est la base de ce que nous appelons la « subjectivité ». La mise en correspondance entre des représentations mentales différentes dépend de la logique et du vécu de l'individu. Ceci vient compléter le stockage de ces représentations mentales, dont l'accumulation se réalise grâce à des capacités de mémoire que possède le cerveau, dont le composant élémentaire est le neurone. Nous verrons donc qu'une description uniquement neuronale est nécessaire mais insuffisante.

Pour la compléter, l'association d'une somme de disciplines est nécessaire, ce que l'on observe dans les travaux les plus récents des sciences cognitives qui intègrent notamment des connaissances en psychologie, anthropologie et philosophie. Ce ne sont pas toutes les connaissances de cette variété disciplinaire qui sont synthétisées dans les sciences cognitives, mais cette approche pluridisciplinaire permet notamment d'avancer dans la connaissance du fonctionnement de la pensée, même si cette connaissance reste toujours incomplète. En effet, la pensée n'est pas qu'objective et rationnelle.

L'intégration de la subjectivité est de fait nécessaire pour en décrire son fonctionnement. De plus, une part chimique est essentielle dans le fonctionnement de la pensée. Toutefois, la pensée se constitue aussi par et dans des rapports avec l'extérieur, les interactions sociales par exemple. Les représentations mentales sont bien entendu inscrites dans le cerveau. Nous le constatons en remarquant qu'une altération du cerveau peut entraîner des pertes de la mémoire d'informations ou des confusions. Cependant, pour s'inscrire dans notre cerveau, il faut tout d'abord qu'elles soient vécues. Et ce vécu est relatif à une histoire individuelle, constituée d'interactions sociales, de réflexions personnelles, qui constituent la vie intérieure du sujet, indissociable de son extériorité.

Pour conclure, nous verrons donc que, même si le fonctionnement cérébral requiert un ensemble de biomolécules, des synthèses moléculaires uniquement produites au sein des vivants, ces biomolécules, et le composant neuronal élémentaire, ne suffisent pas pour le moment à décrire ce qu'est un individu pensant et la notion même de représentation mentale engagée dans la pensée. Les neurosciences étudient comment s'activent les divers circuits, par exemple celui de la récompense, qui est l'un des plus connus. Cependant, « un souci d'objectivité risque de conduire à une Science de l'Homme sans Homme (...) à un savoir sans sujet », comme l'écrit Claude Meyer dans un article sur les représentations mentales. Il faut donc inclure la subjectivité. (Meyer 2001).

La psychanalyse peut être un chemin afin de devenir sujet de sa vie en construisant une représentation de son histoire individuelle. Une théorie totale devrait aussi être capable de décrire toutes les histoires des individus. Or, même si grâce aux travaux de psychiatrie et de psychologie, il est possible d'identifier des normes comportementales et des types de personnalités, et ainsi de construire des catégories, l'interprétation des événements qui conduit à une action, ou à une non-action, demeure multifactoriels. De plus, une (auto)biographie peut même être écrite de diverses manières selon le point de vue de son auteur. Racontera-t-il sa vie comme un drame ou une « Success Story » (histoire d'une réussite) ? L'auto-compréhension possède de nouveau un côté proprement historique et sa description relève de l'herméneutique plus que d'un cadre déductif, déductivo-nomologique.

Aussi, en plus de la subjectivité se pose la question de l'intersubjectivité : comment communiquer avec autrui, notamment ses propres ressentis et comprendre les siens ? Un élément de réponse peut se trouver à travers une diversité de signes (des écrits, des paroles, des dessins, des gestes, des silences, des actions, etc.), mais surtout en ayant partagé des expériences de vie similaires. Ainsi, comprendre prend un tout autre sens que celui des sciences exactes, comprendre passe par la réalisation d'une expérience similaire, vécue, ressentie, générant un sentiment identique. En Inde, certains guides racontent que celui qui voulait faire construire un mausolée pour sa femme défunte,

et qui voulait que sa beauté traduise l'amour et la souffrance produites par la perte d'un être cher, décida de faire tuer la femme de l'architecte qui construirait ce monument : le Taj Mahal. Quelle théorie pourrait décrire toutes ces histoires humaines ? Il est possible de simuler un sourire, mais on ne sait qu'en soi-même quand ce sourire est vrai, c'est-à-dire généré par un événement suscitant la joie, et non par une simulation, une reproduction de cet état par l'administration d'un médicament.

Ainsi, « les représentations » sont un type de composants élémentaires, des « élémentarités », qui permet de « problématiser nos recherches et les partager avec d'autres disciplines », comme l'écrit Meyer (Meyer 2001). Mais, elles ne suffisent pas à décrire l'individualité, comme les fonctions en biologie servent à décrire la singularité du vivant, d'une manière irréductible à l'appréhension physique, mais sans pouvoir la contenir totalement au sein de la biologie, puisqu'elle ne peut traduire le ressenti lui-même d'être en vie, le « vécu de la vie » pourrait-on dire, ni le sens que l'on choisit de donner au fait même d'être vivant. La subjectivité propre à l'individu humain se constitue dans des constructions, dans des expériences qui ne peuvent être thématiques purement et simplement comme de simples objets donnés, de pures « objectités ».

De nouveau, nous verrons qu'une totalisation objectivante ne parvient pas à résorber la richesse d'une expérience, peut-être la plus immédiate que nous ayons, celle d'être un sujet pensant et conscient. Entendons-nous bien, il ne s'agit pas ici de nier que notre vie, comme être biologique, repose sur les constituants fait de particules, d'atomes, de molécules. Il s'agit simplement de prendre en compte que la description d'expériences singulières actualisées au niveau d'un individu complexe ne peut faire l'objet d'une explication universelle. En physique, déjà, ce qui était singulier (des conditions initiales particulières) ne pouvait pas les résorber dans des équations générales. En biologie, ce qui est de l'ordre des détails contingents d'une histoire ne peut faire l'objet d'une théorie prédictive apriori. Ici, c'est ce qui relève d'une histoire tout à fait unique d'un individu (son vécu, sa mémoire) qui ne peut faire l'objet d'une résorption (réduction) théorique.

1. La conscience relative au fonctionnement neuronal et aux neurotransmetteurs.

Comme nous venons de le dire, nous ne nions pas le substrat matériel de la vie mentale. Pour analyser le rapport entre l'activité neuronale et la vie mentale nous passerons par trois étapes. La première étape consiste à aborder l'accès à la conscience d'un point de vue neuronal en nous référant aux travaux de Stanislas Dehaene. Puis, nous évoquerons le contenu de la conscience par une introduction à la vie mentale et à l'importance des neurotransmetteurs dans celle-ci. Enfin, nous verrons que la construction psychique passe par la conscience de l'unité corporelle

et qu'à partir de cette individualisation corporelle émerge une activité propre, relative à la construction identitaire en fonction du rapport d'un individu avec d'autres.

Pour aborder le premier point, l'accès à la conscience, d'un point de vue matériel, il s'agit de définir l'élémentarité chimique de la pensée, le neurone. Le neurone peut être présenté comme l'unité descriptive du fonctionnement particulier des vivants possédant un encéphale. Les neurones sont des cellules nerveuses. Ce sont des « unités fonctionnelles » du système nerveux central. Ils fonctionnent en réseau et s'étendent « dans tout l'organisme », (Simon 2009) puisque le système nerveux central, ou névraxe, comprend l'encéphale et la moelle épinière qui sert de lien neurologique entre la tête et le corps.

Ensuite, le changement d'état des neurones est descriptible par la physique, puisque ces cellules sont excitables et varient rapidement de niveau et l'énergie nécessaire à leur fonctionnement et surtout le glucose. Les neurones sont entourés par les cellules gliales et prolongés par les axones. Plus précisément, le fonctionnement de l'excitation neuronale n'est pas binaire, mais relatif à un rythme prédéterminé « de base à 40 cycles par seconde qui bat la mesure de toute notre activité neurale », comme l'explique Hervé Chneiweiss Il ajoute que ce rythme est la correspondance entre « l'interaction dans le thalamus de neurones et de cellules gliales » et que notre activité cérébrale est « la combinatoire entre trois facteurs, l'un extérieur à l'organisme, les « influences du milieu extérieur », l'autre relatif à notre construction interne, « des informations du milieu intérieur » et enfin un processus fonctionnel, « la mise en œuvre de nos fonctions cognitives ». (Chneiweiss 2005).

Le stimuli génère une variation du potentiel qui est diffusé d'un des sens au système nerveux périphérique à l'ensemble des nerfs repartis dans le corps, jusqu'à la moelle épinière. Puis, il remonte jusqu'au système nerveux central par l'interaction des cellules nerveuses, les neurones, et génère une réaction, une réponse. L'activité neuronale est donc le résultat d'un processus complexe, comme le rappelle le neurobiologiste, en concluant que « l'excitation de nos cellules ne suffit pas à nous faire penser, mais elle est irréductiblement nécessaire à cette pensée » (Morange 2016). Enfin, la synapse est « la zone de contact entre les cellules » (Morange 2016) et, selon Stanislas Dehaene, la matière de la pensée est constituée de « l'embrasement de cette assemblée de neurones » (Dehaene 2014). Nous allons donc analyser la description matérialiste de la pensée décrite par Dehaene en nous référant à l'un de ses livres : *Le code de la conscience*.

Dans cet ouvrage, Dehaene évoque, tout d'abord, l'ensemble des processus inconscients avant d'en venir à sa théorie de la conscience. Ici, l'inconscient renvoie à l'automatisme de nos

actions. En effet, nous passons l'essentiel de nos journées à faire les choses de façon automatique, machinalement. Autrement dit, nous faisons les choses sans avoir conscience qu'on les fait. D'une part, cela vient du fait que nous avons appris à les faire et que nous maîtrisons à présent cette action, comme un pianiste déchiffre une partition ou un lecteur parcourt un livre. D'autre part, cela renvoie à la faculté de mémorisation. Ceci fait partie des facultés cognitives.

De plus, il est possible de connaître par la perception, par exemple. La perception vient du « latin percipio » signifiant « saisir ». Elle se manifeste par les « capacités de reconnaître les personnes, les objets, les couleurs, les odeurs, les bruits et les sons de notre environnement, c'est-à-dire de mettre en relation notre expérience présente de l'environnement avec les expériences passées stockées en mémoire. » (Bartolomeo s.d). Ainsi, la mémoire est un élément de connaissance. Elle permet de se rappeler de l'expérience acquise et de discerner si la chose qui paraît est bonne ou mauvaise. Par exemple, la mémoire permet de se souvenir que le feu brûle. Il est aussi possible de connaître en parcourant l'espace par la motricité et de se représenter des formes par le toucher et la vue. Il est également possible de connaître par le langage par lequel circule des informations symboliques, de connaître par le raisonnement.

Le second point important dans l'ouvrage de Dehaene est le lien entre la signification et la conscience. Pour établir ce lien, il s'agit déjà de définir la conscience. Pour définir la conscience, le neuropsychologue se réfère à la définition de John Locke dans son essai sur l'entendement : « la perception par une personne, de ce qui traverse son propre esprit » (Dehaene 2014). Or, cela sous-tend qu'il faut être conscient pour comprendre, la compréhension signifiant étymologiquement, prendre ensemble, assembler. Cela passe donc par l'analyse des faits, la construction de représentations, et la synthèse. Mais, il est possible d'être conscient et de ne pas comprendre, autrement dit, de ne pas trouver de signification, de lien, entre des faits, soit parce que des informations manquent, soit parce qu'il n'y a pas de lien entre ces faits. Ainsi, il n'est pas possible de les relier. A ce propos, la question est de savoir ce qui justifie ces liens. Alors, l'état conscient sous-tend la conscience de quelque chose.

La question est donc déplacée vers la faculté d'attention, en fonction de la concentration et selon le centre d'intérêt. En effet, l'attention portée sur une chose fait qu'elle n'est pas portée sur une autre. Dans le cas de tâches réalisées en apparence simultanément, elles sont en réalité réalisées successivement, avec un léger écart temporel. L'autre tâche doit « attendre que l'espace conscient soit libéré » (Dehaene 2014). En outre, il évoque le traitement de l'information visuelle, qui montre que la perception est une simplification, ou une réduction de

données. En effet, chaque œil reçoit une image et l'écart entre les deux yeux nécessite un « calcul » qui établit une moyenne et génère la troisième dimension : la perception de la profondeur. (Dehaene 2014). Le cerveau fonctionne alors telle une inférence bayésienne, afin d'identifier le plus probable et ne donne qu'une interprétation possible. On ne voit pas les choses de manière superposée, sauf en cas de diplopie.

A travers *Le code de la conscience*, Dehaene fournit donc un éclaircissement sur la génération des perceptions en relation avec l'activité neuronale et une clarification sémantique. Il cite « l'erreur de Descartes », comme l'écrit Damasio, sur la dualité de l'âme et du corps. Cependant, il ajoute que William James reconnaît sa dette envers le père du *cogito* par le fait qu'il fut le premier à envisager « une mécanique nerveuse qui se suffise entièrement à elle-même » (Dehaene 2014). De plus, l'affirmation célèbre du « je pense donc je suis », peut questionner sur le fait qu'il soit possible de penser sans être conscient, par exemple, par le fait d'avoir des représentations mentales en dormant.

Cela soulève la distinction entre l'état de veille et l'état de sommeil. En dormant, on ne pense pas, dans le sens où on ne raisonne pas, même si des images mentales apparaissent. Il y a donc une distinction entre une image visible, qui « accède à la conscience » et une image, paradoxalement, invisible, « dont le contenu circule pourtant dans nos réseaux corticaux », mais qui n'accède pas à la conscience. (Dehaene 2014). Alors, entre les images invisibles, que l'on voit en dormant, et les images visibles, que l'on ne voit pas, se repose la question de l'attention, et plus précisément de la concentration. Ainsi, Dehaene entre dans la sphère de la subjectivité. Il mentionne les nombreuses expériences à ce propos, dont celle où il est même possible de ne pas voir un homme déguisé en gorille en étant concentré sur autre chose. (Dehaene 2014).

Une fois cet éclaircissement sémantique effectué, le scientifique explique les moyens expérimentaux pour mettre en relation des représentations mentales avec des zones actives du cerveau. Pour comprendre ces phénomènes perceptifs, il présente les techniques pour explorer « les signatures d'une pensée consciente » (Dehaene 2014). Il utilise pour cela depuis vingt ans, l'IRMf, l'Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, « l'électro et la magnétoencéphalographie, en passant par des électrodes implantées dans la profondeur du cortex, pour tenter d'isoler des marqueurs neurophysiologiques » (Dehaene 2014).

Son hypothèse repose sur l'idée que la pensée consciente résulte de la diffusion globale de l'information : « des cellules nerveuses géantes dont les axones longs traversent le cortex de part en part et l'interconnectent pour former un vaste réseau intégré ». (Dehaene 2014). La

conscience émergerait de la cohérence entre toutes ces connexions neuronales, comme des notes jouées ensemble forment des accords. Pour expérimenter cette hypothèse, il utilise des simulations informatiques : « quand un nombre suffisant de régions cérébrales s'accordent sur l'importance d'une information sensorielle, elles se synchronisent pour former un seul état neuronal global. » (Dehaene 2014). En cela, il est possible de penser qu'il y a une hiérarchisation de l'information inconsciente et prioritaire à l'attention. Par exemple, on pourra être concentré sur une tâche, si on sent une odeur de brûlé, on laissera cette tâche pour estimer le risque de ce signal olfactif.

Cependant, comme Dehaene l'avoue : « notre compréhension de la conscience reste rudimentaire » (Dehaene 2014). En effet, affirmer qu'un individu est conscient suppose de répondre à la question « conscient de quoi ». Ainsi, Dehaene travaille, notamment avec Changeux et Naccache, pour augmenter ces connaissances autour d'une ambitieuse théorie de la conscience. Déjà, comprendre quand apparaît et disparaît la conscience pourrait résoudre des dilemmes éthiques, par exemple, sur le début et la fin de vie (consciente). (Dehaene 2014). Savoir à partir de quand la personne ressent ou ne ressent plus d'expériences subjectives pourrait donner une autre délimitation de la vie, la vie *perceptive*.

Déjà, en 1995, avec Claire Sergent, et la technique de l'EEG, il a suivi « l'enchaînement des étapes qui conduisent à la conscience » (Dehaene 2014). Entre l'accès à la conscience d'un événement et la réalisation de l'événement, il y a un petit décalage temporel. Ensuite, l'information se diffuse. L'ensemble du processus est décrit en ces termes par le chercheur :

« L'accès à la conscience correspond à une onde d'activité neuronale qui progresse jusqu'à un point de non-retour. Chaque stimulation consciente déclenche une avalanche de décharges neuronales qui s'amplifie elle-même et finit par embraser des régions corticales distantes les unes des autres pour former un état cohérent. Cet état de conscience démarre environ un tiers de seconde après que le stimulus est apparu sur la rétine. (...) » (Dehaene 2014). Afin de savoir si l'information est consciente ou non, il est possible d'identifier l'accès à la conscience par trois propriétés : « la stabilité, (...) la reproductibilité, (...) et l'invariance ». (Dehaene 2014).

Ensuite, il est possible de recréer des états cérébraux naturellement, ce que nous faisons pendant notre sommeil, ou artificiellement, par « stimulation magnétique transcrânienne ». (Dehaene 2014). Cela permet de modifier l'activité cérébrale et le contenu de la conscience de l'extérieur du cerveau. Ainsi, ces expériences montrent le lien entre « les états neuronaux et les états mentaux », mais sans prouver la relation causale entre les deux. (Dehaene 2014). Par contre, la

stimulation cérébrale démontre « la relation causale entre l'activité électrique du cortex et l'expérience subjective » (Dehaene 2014).

De plus, toutes nos perceptions, nos états de consciences, sont liés à « l'activation des vastes circuits cérébraux du cortex ». (Dehaene 2014). Et, la plupart des neuroscientifiques considèrent qu'il serait possible que continue à fonctionner « un cerveau dans une cuve », selon l'idée de Putnam.⁴³ Par l'optogénétique, technique d'activation des neurones par la lumière, n'importe quelle région cérébrale peut être activée artificiellement. Alors, Dehaene est confiant sur le décodage de la conscience et « du code neural qui fonde notre vie mentale » dans les décennies à venir. (Dehaene 2014).

D'une part, il mentionne que parmi l'ensemble des représentations inconscientes, l'une d'elle est sélectionnée en rapport « à nos buts actuels ». (Dehaene 2014). Mais, cela questionne sur la détermination de ces buts par la volonté et sur le libre arbitre. D'autre part, il considère déjà depuis 1998, avec Changeux, le concept d'« espace de travail neuronal global » avec plusieurs paramètres : « des systèmes d'évaluation (valeur), des systèmes attentionnels (focalisation) » et des systèmes temporels : « mémoire à long terme (passé), systèmes perceptifs (présent), systèmes moteurs (futur) ». (Dehaene 2014).

En outre, il postule également plusieurs raisons pour lesquelles les représentations peuvent rester inconscientes : soit parce que l'attention n'est pas associée à cet embrasement, soit parce que le signal est trop faible, déconnecté, etc (Dehaene 2014). Ainsi, il souhaite décrire « les états subjectifs de la matière » en expliquant la circulation de l'information entre les réseaux neuronaux et l'accès à la conscience, par le fait que l'information doit préalablement être codée dans les neurones. Même si l'état de la recherche n'en est pas là, selon Dehaene, il n'y a aucun doute sur le fait qu'un programme d'ordinateur puisse un jour reproduire un état de conscience. (Dehaene 2014).

Par ailleurs, il soulève le vide épistémologique concernant la vie mentale des personnes dont l'état de conscience est minimal. Un vide qui soulève, lui aussi, des questions éthiques concernant les personnes dans un état dit végétatif apparent. Puis, il propose une manière d'établir un rapport entre les divers états de conscience possibles par la quantification « d'informations échangées à travers le cortex ». Or, cette mesure permet d'aller dans le sens

⁴³ Id.p.220 . Putman envisage la question de savoir si on pourrait distinguer notre état naturel (là où notre cerveau est dans notre corps) et un état où notre cerveau serait plongé dans une cuve peuplée de liquide physiologique et stimulé par un ordinateur extérieur qui simulerait toutes les sensations et perceptions d'une vie courante.

de son hypothèse selon laquelle « l'échange d'informations à longue distance est une des fonctions essentielles de la conscience » (Dehaene 2014).

S'il est possible de mesurer les états de conscience, la question de l'émergence de la conscience est posée. Là aussi, l'auteur émet une hypothèse à ce propos. Par les connaissances en pharmacologie et la connaissance du milieu utérin, il est possible d'envisager que le fœtus se trouve comme « sous anesthésie ». Puis, qu'à la naissance, il se trouve basculé dans un état d'éveil maximal par ce changement de milieu. Alors, en plus de la naissance d'un être vivant, la naissance serait déjà « la naissance d'un esprit conscient » (Dehaene 2014) mais « conscient de quoi » ?

Dès lors, deux nouvelles questions se posent, d'une part, l'accès à la conscience est-il une faculté de tous les êtres vivants et de quoi est-on conscient ? Pour répondre, nous allons introduire au fait de la vie mentale des animaux. D'autre part, qu'en est-il de la conscience de soi ? Nous donnerons un élément de réponse en abordant la notion d'identité qui implique les échanges avec un environnement extérieur à soi, et pas seulement des connections internes (neuronales). Un rapport de l'INRAE sur *la conscience animale* mentionne que « l'essence de la conscience est la capacité des différentes structures nerveuses à intégrer l'information ». ⁴⁴ Aussi, faut-il qu'il y ait des informations provenant de l'extérieur, des stimulis. Ensuite, il y a une réponse à cette information, la construction d'une représentation mentale que suscite un événement, une stimulation en fonction d'une base de données internes. Or, d'après des expérimentations, il est possible d'affirmer que certains animaux ont des « émotions conscientes ». Les émotions sont identifiées par des modulations « des capacités cognitives impliquant des changements attentionnels, d'apprentissage, du jugement, ou de la mémoire. »

Ensuite, la métacognition permet de définir la conscience de soi par l'évaluation de ses propres connaissances. Elle est aussi mesurable chez les animaux par une expérience adaptée : l'animal peut signifier son état de connaissance en appuyant sur des boutons différents pour indiquer s'il sait, ne sait pas ou ne sait pas s'il sait. Ainsi, il a été évalué que certains animaux possèdent des capacités métacognitives. La faculté cognitive de mémorisation et de repère temporels est aussi illustrée par « les comportements migratoires » et les comportements sociaux sont largement étudiés. Les relations affectives de l'animal sont aussi observées. La différence de comportement selon les personnes montre des préférences et l'attachement envers certaines :

⁴⁴ « La conscience animale - Résumé de l'expertise scientifique collective », sur INRAE, mai 2017.

« des processus conscients, et non-prédéterminés et automatiques, peuvent se produire dans la mise en place de relations homme-animal. »

La connaissance humaine de la conscience animale devrait aussi poser des questions éthiques sur le traitement que l'un fait subir à l'autre. En ce sens, l'étude de la conscience suscite la nécessité d'une éthique, à l'échelle collective. Enfin, la conscience de soi est donc la conscience de son corps, une identification corporelle, et psychique, en fonction d'un processus de construction identitaire, mais aussi une considération des conséquences de ses actions. La question se pose donc de la caractérisation de l'individu par-delà l'instant où l'individu est conscient, par la somme des actions et des représentations mentales accumulées durant sa vie.

L'individu possède un univers de représentations plus ou moins figé selon sa capacité d'intégration de nouvelles données. Ainsi, l'esprit est comparable à une bibliothèque où sont indexés nos *Big Data*. Le nuage électronique réparti dans notre cerveau contient toutes nos informations mentales conscientes et inconscientes. Il les stocke et les réactualise en fonction des événements. Le souvenir de l'apparence que l'on a d'une personne, par exemple, est mis à jour quand on la revoit 20 ans après. Le ressenti, plus ou moins agréable, que l'on a en pensant à une personne est aussi synthétisé en fonction de l'ensemble des interactions passées et va conditionner notre attitude présente et à venir. Des sensations, aux percepts en général, vont émerger des ressentis particuliers.

Ainsi, les madeleines vont devenir pour Proust le « goût » de son enfance, par une narration autobiographique dans laquelle les choses s'imprègnent des couleurs de notre histoire personnelle, où tout ce qui est connu de nous ne nous laissera pas indifférent et sera teinté d'associations mentales, sculptant notre univers subjectif. En évoquant un chat noir en général, je repenserai à ce chat noir, en particulier, par exemple celui qui fut le mien, un des animaux avec lesquels j'ai grandi, qui se singularisait par sa couleur, en rapport aux autres, mais aussi par les traits de son espèce, par son comportement et son histoire individuelle. Le chat correspond à une catégorie. Le chat caractérisé par la couleur noire un sous-ensemble. Mais ces catégories et sous-ensembles n'existent que parce qu'ils correspondent à des individus ayant ces traits.

Ainsi, les souvenirs sont indiqués par des mots et des formes qui émergent à la conscience quand on les nomme, quand on les voit, quand on y pense, quand on en rêve ou quand quelque chose nous les rappelle. A ce moment, le sentiment qui accompagnait ce vécu réapparaît. Il rappelle l'état émotionnel qu'il recrée la détente des vacances, la joie des moments en famille,

l'angoisse des examens, etc. De plus, le souvenir génère un nouvel état émotionnel qui peut être le soulagement et la satisfaction de la réussite à un examen, la nostalgie de moments passés avec des personnes défunt, l'excitation à la pensée d'un projet que l'on va réaliser. Or, ces états émotionnels ne sont pas sans effets chimiques dans notre corps et ils peuvent être produits artificiellement par la prescription de médicaments dans le cas de déficit de certains neuropeptides, un type d'hormones. Les hormones sont des sécrétions produites par des glandes endocrines qui modifient le fonctionnement des organes. Par exemple, des neuropeptides, comme l'ocytocine, vont jouer le rôle de neurotransmetteurs, des acides aminés libérés par les neurones.

Ainsi, si on s'intéresse à identifier la localisation des aires cérébrales qui s'activent en fonction de nos perceptions ou activités cognitives, il ne faut pas en oublier l'effet chimique qu'elles génèrent. Par exemple, dans un article en ligne, le formateur en « neuropédagogie » Pascal Roulois, présente quelques éléments clé de la chimie du cerveau. (Roulois 2010) Le site l'institut du Cerveau, quant à lui évoque la multifonctionnalité d'une de ces molécules du cerveau. Le neurotransmetteur d'acétylcholine qui favorise la mémoire à long terme. La production d'épinephrine, connu sous le nom d'adrénaline, est une hormone, liée à la nécessité de répondre en urgence. Elle génère une pression qui engendre à la fois excitation et stress. Ensuite, le cortisol est justement la molécule libérée en cas de stress donnant l'énergie pour agir et réfléchir. De plus, la dopamine est une neurohormone, une hormone produite par le cerveau, qui pousse à entreprendre. Au contraire, l'endorphine est une opiacée. Elle a un effet antalgique naturel, apaisant. Les GABA (Acide Gamma-aminobutyrique) génèrent la concentration. La mélatonine est liée à l'état de veille et de sommeil. L'ocytocine se développe lors de relations sociales. La sérotonine est un neuromodulateur, qui sert donc à « moduler la communication entre d'autres neurones dans notre cerveau ». Elle possède de multiples fonctions : « Elle est impliquée notamment dans la régulation des comportements, l'humeur, l'anxiété ou encore l'apprentissage ».⁴⁵ En plus de comprendre le rôle de ces molécules, il est intéressant de constater qu'elles apparaissent dans des états très particuliers de la matière complexe, ceux du vivant ayant une organisation cérébrale.

Ainsi, des composés chimiques et des facultés particulières émergent à partir du cerveau. Aussi, le concept d'esprit, synthétisant toutes les représentations mentales et la vie psychique d'un

⁴⁵ « Une nouvelle étude sur le rôle joué par la sérotonine dans la prise de décision. », sur *Institut du cerveau*, 21 mars 2017 (en ligne : <https://institutducerveau-icm.org/fr/actualite/une-nouvelle-etude-sur-le-role-joue-par-la-serotonine-dans-la-prise-de-decision/>).

individu, ne peut se penser dans les extrêmes, comme le souligne Antonio Damasio dans son livre sur une *nouvelle théorie de la conscience*, qui est finalement plutôt une théorie de l'esprit :

« Toute théorie qui contourne le système nerveux pour expliquer l'existence de l'esprit et de la conscience est condamnée à l'échec. (...) A l'inverse, toute théorie qui voudrait rendre compte de l'esprit et de la conscience en s'appuyant exclusivement sur le système nerveux est elle aussi condamnée à l'échec. » (Damasio 2021)

En effet, il semble que pour l'esprit, comme pour toutes choses, l'exactitude soit dans la nuance. D'un côté, les facultés sensibles, mentales et cognitives, comme nous l'avons vu, apparaissent à partir du fonctionnement cérébral, lui-même constitué de cellules, elles-mêmes constituées de molécules. Il n'est dès lors pas possible de penser à la pensée sans inclure ces données matérielles dans notre connaissance et la description de celle-ci. Cependant, chaque niveau d'organisation possède ses spécificités. Nous l'avons vu à travers le passage de l'inorganique à l'organique avec le fonctionnement cellulaire, nous le voyons encore par le passage du vivant au pensant avec le fonctionnement cérébral. Des éléments chimiques spécifiques émergent du fonctionnement neuronal et induisent des conséquences pour l'ensemble de l'organisme et sur le comportement comme les sensations ou la conscience de soi. Damasio insiste donc sur le lien profond entre le corps et le cerveau et il explique la distinction entre la conscience et les formes d'intelligence.

2. La perception et la diversité d'intelligences.

Dans *Sentir et savoir*, Damasio décrit ces particularités communes au vivant et rappelle que « le corps et le cerveau ont la possibilité d'interagir directement et abondamment » (Damasio 2021). Plus loin, il ajoute que « (...) le système nerveux se marie au corps, ce dernier lui apporte les bases de son intelligence biologique » (Damasio 2021). Ensuite, le neuroscientifique et professeur de philosophie insiste sur la variabilité des formes d'intelligence pour arriver à conceptualiser l'esprit.

Tout d'abord, il décrit une intelligence biologique qui correspond à l'homéostasie, une intelligence qui se réfère au déroulement de processus physiologiques, puisqu'il définit l'homéostasie comme « le processus qui maintient les paramètres physiologiques d'un organisme vivant ». (Damasio 2021). Il s'agit des processus qui permettent à l'organisme de

demeurer dans un état d'équilibre et de survivre. Il y ajoute le signalement physiologique qui donne les émotions, comme un complément à l'homéostasie pour informer l'individu des actions et de l'environnement qui favorisent son équilibre et au contraire ce qui lui nuit.

Toujours dans la nuance de son raisonnement, il mentionne l'existence d'intelligence sans conscience, et sans esprit, en distinguant des intelligences qu'il nomme secrètes, d'autres qu'il nomme ostensibles. (Damasio 2021). Ces intelligences désignent en fait le déroulement automatique de processus naturels (biochimiques ou neurochimiques). La première forme d'intelligence, secrète, décrit les phénomènes organisés de la vie par l'existence de structures biochimiques, notamment le développement cellulaire. La seconde forme d'intelligence, ostensible, est celle qui est observée par le fonctionnement neurobiologique du système nerveux décrit par la neurochimie et la neuropsychologie. Aussi, il précise la manifestation de l'intelligence secrète : « (...) les organismes vivants sont parvenus à sentir leurs semblables et leurs environnements. Par « sentir », j'entends détecter une « présence » (...) » (Damasio 2021). et l'apparition tardive de l'intelligence ostensible dans l'évolution de la vie : « La vie s'est déployée sans mot ni pensée, sans sentiment et sans raison, dépourvue d'esprits ou de consciences » (Damasio 2021). En effet, la première forme de savoir, est donnée par les sens. Sentir, est le premier pas vers la connaissance et la singularité du vivant. La sensibilité distingue le vivant de l'inerte.

Puis, il évoque les bactéries, qui sont vivantes et intelligentes, mais qui n'ont pas d'esprit, en distinguant l'autonomie de la cognition. Ensuite, il associe l'apparition de l'esprit aux fonctionnalités qui se développent dans le cerveau : les systèmes nerveux « (...) se mirent bientôt à gérer les actions, mais aussi à représenter des modèles (patterns), puis à engendrer des cartes et des images. L'esprit allait naître. » (Damasio 2021).

Ainsi, il distingue les sens, le fait de sentir, qu'il associe au fait de détecter et l'esprit, le fait de savoir, qu'il associe au fait de se représenter. Le contenu de l'esprit est alors les images que nous créons et combinons (Damasio 2021). A présent, clarifions certains termes cités. Tout d'abord, on peut traduire « pattern » par motif (au sens large du terme : figure géométrique), motif géométrique est aussi une bonne traduction. Cependant, un graphe n'est pas un « pattern » : c'est un ensemble de nœuds reliés entre eux par divers liens (il n'est un pattern que si on le considère comme un dessin géométrique, mais ce n'est pas cela qui importe d'abord dans un graphe).

Ensuite, les images engendrées sont des représentations mentales, des pensées, qui peuvent être conscientes et inconscientes. Il explique donc la différence entre savoir et sentir, qui ne nécessite pas d'être conscient, ni doté d'un esprit capable de former des images. Il s'agit seulement d'identifier l'émetteur, le récepteur, les modes d'émission, de réception, l'information et la réponse qu'elle engendre. Par exemple, les plantes sont « sensibles » à des produits anesthésiants et peuvent plonger « dans un profond sommeil » (Damasio 2021). Elles possèdent donc un état d'éveil, quand elles sont ouvertes, et de sommeil, quand elles se referment sur elles-mêmes. Mais, selon Damasio, le cycle veille/sommeil n'est pas le moyen d'identifier la conscience. La veille sera pour les plantes le moment où elles peuvent sentir et le sommeil, le moment où elles ne sentent plus.

La conscience est différente de la sensation. Elle est « une sorte particulière d'état...d'esprit : sans esprit, pas de conscience. » (Damasio 2021). Selon les définitions qu'en donne Damasio, « tous les mammifères, les oiseaux et les poissons jouissent d'un esprit et d'une conscience. », et peut-être que les « insectes sociaux » aussi, ajoute-t-il. Pour le scientifique et philosophe, « ce dont nous devenons conscients, c'est du contenu de notre esprit. » (Damasio 2021). Sentir est le fait de détecter des « stimuli sensoriels (la lumière, la chaleur, le froid, les vibrations, les chocs...) » et de pouvoir répondre à ces sollicitations extérieures aux organismes. (Damasio 2021). Tous les êtres vivants possèdent cette faculté de sentir et de réagir à ces sensations. Cependant, tous les êtres vivants ne sont pas conscients de ce qu'ils font. Il faut pour cela former des limites entre ce qui produit l'action, ou émet un signal, l'agent, et celui qui la subit, ou reçoit l'information, pour identifier la réponse. Il s'agit donc de la conscience de soi et de la responsabilité de son action individuelle. Or, l'intelligence sans esprit correspond à des réflexes ou des habitudes. Par exemple, Damasio cite les ramifications sous-terraines des racines des arbres qui leur permettent de partager des informations (Damasio 2021), alors que l'intelligence avec esprit produit des contenus représentationnels, des représentations cérébrales, des images mentales ou conceptuelles.

En outre, il s'agit d'analyser comment se forment ces représentations. Elles peuvent être la mémoire de percepts, (la forme d'une fleur, la couleur d'un papillon, le parfum de l'herbe, le velours de la peau de pêche, la mémoire du visage de personnes), le souvenir d'une fonction (savoir à quoi peut être utile un objet), la mémoire formelle des concepts (le travail, la société, etc.), la mémoire émotionnelle (la joie et l'apaisement que procurent le bruit des vagues). Dans le même sens, Damasio insiste sur la place des sentiments, dans le contenu de l'esprit, qui apportent des indications de « qualité » (Damasio 2021), selon l'émotion que génèrent les choses. Elles peuvent sembler agréables, plaisantes à regarder, à entendre, etc. Il s'agit donc de

la manifestation de la subjectivité où s'exprime l'individualité. Par exemple, dans une exposition de peinture, chacun ne va pas être attiré par la même œuvre. Indépendamment des œuvres célèbres, certaines vont plus nous toucher que d'autres, et pas forcément à cause d'un même critère esthétique. Le détail d'une œuvre peut attirer l'attention car nous connaissons le paysage qui est représenté, ou la lumière nous procure un sentiment d'harmonie avec la palette de couleurs utilisée, ou encore l'originalité d'une technique ou de la figuration peut provoquer l'étonnement, le questionnement et susciter un arrêt devant le tableau, rappeler un événement de sa vie personnelle.

Concrètement, toutes ces représentations mentales sont liées à « l'activité neuronale (...) distribuée spatialement sur plusieurs réseaux de neurones et constitue naturellement des schémas (*pattern*). (...) cette spatialité est au cœur de ce qu'est l'esprit. » (Damasio 2021). Cette spatialité est décrite par la neuroanatomie et la neurophysiologie comme correspondant à « des cartes dynamiques » produites à haute vitesse dans les cortex cérébraux des différents systèmes sensoriels » (Damasio 2021). De plus, il est postulé qu'elles sont fabriquées à différents endroits, à différents moments, avec différents grains » et il n'y a pas de connaissance scientifique prouvée sur « l'emplacement » de ces images. (Damasio 2021). Mais, Damasio rappelle que la conscience ne requiert pas un recours au niveau inférieur. Soulignons qu'elle réfère avant tout à l'histoire personnelle de l'individu. Nous retrouvons ici avec Damasio, un des éléments cruciaux de notre réflexion, c'est l'historicité, la singularité de la trajectoire individuelle qui caractérise le vécu de la pensée, de la conscience et qui empêche, sans renier le « substrat physique » une réduction de leur explication à une théorie universelle du genre de celle de la physique.

Enfin, le neuroscientifique revient sur les recherches de transfert de la pensée sur ordinateur. Après avoir clarifié ce que sont les « algorithmes », un ensemble de règles, qu'il compare à des recettes de cuisine, il explique, par cette métaphore, que la recette d'un plat n'est pas le plat. Aussi, les recherches pour transférer un esprit dans un ordinateur sont, selon lui, vouées à l'échec, car ce ne serait que les règles qui seraient transférées, le mode d'emploi, et pas la réalisation. Et quand bien même, si le cerveau pouvait subsister sans le corps « dans une cuve » ou dans un ordinateur, où l'on aurait reproduit artificiellement les stimulations électriques des zones cérébrales, ou encore enfermé dans un humanoïde, pourrait-on encore appeler cela « vivre » tant nos facultés seraient modifiées et réduites ? Ajouter des prothèses au corps permet de lui rendre l'ensemble de ses fonctionnalités, les implants ajoutent des sensations, mais le transfert de la pensée sans le corps serait une réduction des facultés humaines. De plus, que dire de la construction de machines dites « sensibles et conscientes », sinon que « le « degré » de

conscience potentiel dont elles pourraient jouir dépendra de la complexité de leur représentations internes » (Damasio 2021).

Ainsi, la conscience permet l'expérience, l'expérience passe par le ressenti et le sentiment, qui « n'est pas purement mental » (Damasio 2021). Il passe par toute la chair jusqu'au frisson de l'émotion de peur ou de joie. Par exemple, comment pourrait se traduire cette réaction physiologique qu'on nomme la chair de poule, quand on a froid ou peur, dans un composé mécatronique ? De plus, nous avons vu que les représentations mentales n'apparaissent pas que lorsqu'on est éveillé. Pensons aux rêves. Alors, l'ensemble des représentations mentales, conscientes et inconscientes est synthétisé dans ce que l'on nomme l'activité psychique. L'activité psychique est le terrain de la réflexivité, de la subjectivité d'un organisme en interaction avec un environnement. Or, cette activité psychique ne peut pas être programmée et difficilement pensée sans un corps organique, certes, mais aussi sans histoire. Et l'histoire s'écrit par la somme d'interactions avec l'environnement, autrui et une diversité de collectifs.

Bref, on ne peut vraiment penser notre pensée sans tenir compte de son environnement dans notre « chair », dans notre corps, constitué par et dans une histoire qui n'est jamais totalement identique à celle des autres et dont la singularité et les contingences ne peuvent être déployées a priori dans un cadre théorique formés de lois ou d'algorithmes. Il ne s'agit pas ici, pour celles et ceux qui défendent un matérialisme de renoncer à cette philosophie. Il s'agit seulement de reconnaître que la compréhension de la contingence et de l'historicité demande un autre schème explicatif que celui du calcul et de la déduction à partir de lois universelles.

3.La construction identitaire en fonction des rapports avec autrui.

Nous passons du fait d'être sensible, de détecter la présence, au fait de construire des images par un processus d'identification qui requière de poser des limites, dont la première est celle de soi et de l'autre. Ce processus engendre une démarche réflexive, au moins élémentaire, où il ne s'agit pas que de répondre automatiquement à un signal (détecteur de présence), mais de qualifier la présence d'autrui, de signifier la sienne et d'avoir une attitude appropriée en fonction d'une analyse de la nature de la relation entre les deux (basiquement, est-ce un danger ? Ou une opportunité pour sa survie ?).

Tout d'abord, la conscience de soi passe par la proprioception, qui est la conscience de son unité corporelle dans l'espace (schéma corporel). Ainsi, à partir de cette conscience corporelle apparaît une délimitation où l'intégrité de l'individu passe par l'entièreté de son corps et l'altérité est ce qui est extérieur à ce corps. A partir de cette conscience élémentaire de soi par sa corporéité, le soi est identifiable à une histoire de vie, unique, en fonction de ses échanges avec l'altérité, tous les autres individus, toutes les autres choses, que soi.

Cependant, soi ne se réduit pas, pour certains individus à une individualité biologique, et à la protection de l'intégrité d'un organisme. En effet, il est possible de narrer une histoire propre à chaque individu, une histoire de vie, aussi relative à ce qui anime cet individu par ses désirs et ses valeurs. Cela nous conduit donc à l'individuation par la construction identitaire. Nous allons donc analyser ce qui caractérise un individu en fonction d'une construction identitaire impliquant la détermination de finalités (pourquoi faire telle ou telle action, pourquoi se comporter ainsi), ce qui fait passer de l'objet, qui agit automatiquement, au sujet, qui réfléchit et agit en fonction d'une fin. Ces dimensions sont descriptibles conceptuellement.

Afin d'évoquer la construction identitaire, nous avons choisi de nous référer au dictionnaire intitulé *L'identité* (Gayon 2020). Cet ouvrage, réalisé, jusqu'à son décès, sous la direction de Jean Gayon, philosophe, spécialiste la philosophie et de l'histoire des sciences et de l'épistémologie, plus particulièrement de la philosophie de la biologie, rapporte le concept d'identité à son fondement philosophique et présente l'apport de plusieurs disciplines sur la question.

D'une part, l'identité y est définie comme individuelle par ses dimensions psychique, génétique et narrative, relative à son histoire. D'autre part, l'identité est en rapport au collectif par ses dimensions « sociale, ethnique, familiale, genrée, linguistique, ou encore nationale ». (Gayon 2020). Une telle présentation démontre qu'une description neuropsychologique est donc nécessaire pour comprendre les processus internes et cérébraux, mais qu'elle est incomplète pour décrire un individu qui se construit aussi par des interactions extérieures. Ainsi, la philosophie et la sociologie, par exemple, complètent la description neuropsychologique par l'analyse des rapports entre l'individuel et le collectif. Or, le fait même d'être dans un environnement plutôt qu'un autre est relatif à des mécanismes d'appartenance.

Pour commencer, je suis née dans un endroit, et pas dans un autre, à cause de ma parenté. Puis, je vais être éduquée par un groupe d'individus, éduquée signifie que ce groupe va normalement contribuer à mon intégration à ce groupe, puis à des groupes plus grands, et donc à mon

développement. Je vais donc par mimétisme me sentir semblable et adopter des modes de vie similaires. Puis, je vais pouvoir rencontrer d'autres groupes et choisir le mode de vie que je préfère adopter. Ainsi, deux paramètres élémentaires sont à considérer : le milieu (conditions de vie) et le mode de vie (manière de se comporter). Par exemple, je ne peux pas vivre continuellement dans l'eau. Il y a donc des contraintes naturelles qui distinguent les vivants : des conditions de vie. Ensuite, il y a parfois des degrés de liberté. Si je suis mobile, je peux me mettre plutôt à l'ombre ou m'exposer au soleil. Mon mode de vie va rejoindre élémentairement mes divers besoins, déjà physiologiques (Cf. Pyramide de Maslow). Je vais me mettre à l'ombre si j'ai chaud, au soleil si j'ai froid. On distingue donc la constitution de groupes d'individus, selon leur lieu de vie, ensuite, selon leur mode de vie (ce qu'ils font et de quelle manière), par exemple, le régime alimentaire et la manière d'obtenir de la nourriture. La constitution de groupe d'individus, ou construction en société des animaux, est décrite par la notion d'intégration. Il est possible d'identifier trois niveaux : « les interactions, les relations et les réseaux sociaux ». On distingue les interactions sociales des relations sociales par leur nature et leur temporalité. Généralement, les premières sont sensibles. Il s'agit des échanges tactiles notamment entre individus. Les secondes sont cognitives. Elles font appel à la mémoire des échanges passés et de leurs conséquences. Enfin, les réseaux sociaux impliquent une hiérarchie par un « niveau d'intégration supérieur », un ordre.

La société est établie sur un rapport de domination et la domination par la force. Cependant, certaines espèces préfèrent vivre en solitaire, et leurs interactions se limitent à la rencontre du sexe opposé mue par l'instinct de reproduction, garante de la survie d'une espèce. La construction d'une société, association de plusieurs individus, requiert plusieurs paramètres, dont le premier est le plus couramment un groupement par espèce en vue de perdurer dans le temps. On distingue donc les relations entre individus d'une même espèce et les relations entre individus d'autres espèces. L'appartenance à un groupe est même identifiable chimiquement chez certains insectes, « le corps des individus porte des marqueurs chimiques communs aux membres de la colonie, ce qui signe leur appartenance à un même groupe. » (Thierry s.d). De plus, on peut décrire les « types de groupements suivant la structure démographique et la durée de l'association des individus ». Le premier groupe, le plus simple est « le couple reproducteur avec sa progéniture. » (Thierry s.d). Dans un groupe plus étendu, chaque individu doit identifier sa place. Si les liens ne sont pas généalogiques, ils doivent être fonctionnels. Les rapports entre individus fonctionnent alors soit par coopération, l'entraide, soit par compétition, prendre une place qui ne peut appartenir à plusieurs. A partir de ce fonctionnement se tissent des liens pacifiques ou belliqueux. La répression des tensions se fera par une intervention extérieure, d'autres membres du groupe, en vue de retrouver la cohésion

d'ensemble, ou par intérêts individuels. Mais, elle peut aussi se solder par un échec et faire émerger un nouveau groupe. Ainsi, apparaissent les caractères des individus, plutôt conciliant ou désireux de dominer et de posséder davantage.

Par ailleurs, il n'y a « pas d'entité sans identité », comme l'écrit Vincent Descombes. (Descombes 2020). L'entité est relative à une identification. L'identification n'est pas une classification, elle sous-tend « une individuation des êtres au sein d'un même genre (Wiggins, 2001) ». D'une part, l'identique, la signification du même, est un marqueur ontologique. D'autre part, il s'agit d'approfondir la description par la distinction en exprimant l'altérité, les types de différences. Par exemple, l'identique se manifeste par notre mode d'être au monde, vivant, organique, ou inorganique, conscient d'exister ou non, puis, nos apparences, nos manières de nous comporter, nos actions. La construction de l'identité passe donc par la prise de conscience de normes naturelles, déterminées, et sociales, construites par des individus conscients.

La construction de l'identité passe par l'accumulation d'événements qui va constituer l'histoire de l'individu et la mémoire de cette histoire, qui nécessite une « intégrité cérébrale » et qui peut être altérée par diverses pathologies (Gayon 2020). Bien entendu, la question de la construction identitaire passe déjà par une définition du moment à partir duquel commence l'histoire de l'individuation psychique. Biologiquement, l'individuation commence dès le premier instant de la fécondation. L'embryon est donc déjà « une personne potentielle », si l'identification est cellulaire. (Gayon 2020). Mais, l'identification peut considérer un état de développement plus avancé, à partir de la quatrième semaine, par exemple, où débute l'organogenèse et la distinction de l'ectoderme, du mésoderme et de l'endoderme. Par ailleurs, la construction de l'individu en rapport à la biologie intègre déjà les géniteurs et la filiation dans le vivant. L'individu n'apparaît pas de rien, mais de la fusion de deux gamètes.

La construction de l'individuation psychique passe par la construction des connections neuronales et par leur plasticité. Elle permet de percevoir et de tisser des relations entre les données recueillies par les diverses facultés perceptives et cognitives. Les premiers éléments d'identification par la cognition passent par l'identification des visages, qui est un trait de singularité de chaque individu : « l'enfant s'identifie à son visage et apprend à le distinguer de celui des autres au cours du développement ». (Gayon 2020). L'animal distingue aussi les visages. « Identifier et reconnaître son propre visage repose sur des traitements unisensoriels (visuels) et mnésiques, (...) », précise Alain Berthoz et Bérangère Thirioux en insistant sur « les bases neurales » (Berthoz, Thirioux 2020) de la construction de l'identification par

l'appropriation de son schéma corporel. Et, François Villa rappelle que la question « qui suis-je » renvoie à celle de l'inné et de l'acquis.

La génétique apporte des connaissances sur les caractères héréditaires et l'épigénétique des connaissances supplémentaires pour se libérer du déterminisme génétique, notamment par la référence au choix du mode de vie, comme l'explique Joël de Rosnay dans *La symphonie du vivant*. De plus, la plasticité dans le vivant laisse un espace de liberté : une « potentialité de transformation » et d'apprentissage. (Gayon 2020). En outre, l'identification peut être génétique, comme nous l'avons vu, par la transmission d'un même génome pour une espèce et le marqueur d'une singularité par la recombinaison chromosomique générant un être unique d'un point de vue génétique, mais pas seulement.

Les modes de communication sont aussi des éléments de construction identitaire, et en particulier le langage. Béatrice Godart-Wendling souligne la place du langage dans le récit mythique de la tour de Babel. Le langage est fédérateur, puisqu'il permet de communiquer, de créer du lien social. Mais par l'existence d'une diversité de langues, il peut être un facteur d'exclusion, quand on ne connaît pas celle qui est utilisée. Il en est de même pour le langage mathématique, qui est le langage de beaucoup de sciences, et qui exclut de fait ceux qui ne le maîtrise pas si ce langage n'est pas traduit (vulgarisé). Le langage permet donc d'identifier l'origine ethnique des individus, puisque l'ethnie est caractérisée par un langage et une culture. Mais le langage est aussi un marqueur social, selon le registre de langage employé, témoignant du niveau d'éducation et de développement. En cela, le langage peut être à la fois un facteur d'exclusion, dissociation par groupes (communautarisme), ou un facteur d'intégration en un peuple, d'individus soumis aux mêmes règles.

Nous comprenons donc que l'identité est relative au sentiment d'appartenance induit par des processus d'intégration à un groupe, ou à des groupes d'individus, des collectifs. Or, l'association en groupe d'individus, en collectifs, est impulsée soit par un besoin (survie), soit par un désir (appétence). Dans les temps préhistoriques, les humains pouvaient déjà se ressembler pour leur survie face aux dangers de la nature et des bêtes féroces. Face à cette nécessité d'être ensemble pour survivre, nous sommes loin de la définition de Durkheim selon qui « l'homme n'est un homme que parce qu'il vit en société » (Gayon 2020). Encore faut-il caractériser les finalités de la société. De plus, d'autres espèces font société, comme nous l'avons vu.

Le premier motif pour faire société est donc la survie, la recherche de sécurité, mais ce n'est pas le seul. Il y a une diversité d'appétences constituant une diversité de collectifs selon, par exemple, un désir de connaître ce qui existe (sciences), de créer (arts), de partager ou fédérer autour d'une cause. L'individu est donc mu à la fois par un désir d'intégration à des collectifs, de partage, et par un désir d'émancipation, de singularisation. Mais, en choisissant de ne pas vivre seul, l'individu doit forcément se soumettre aux règles des collectifs qu'il intègre. Il s'agit donc d'identifier le degré d'autonomie d'un individu, « norme ou loi qu'il génère par lui-même » (Gayon 2020) et se manifeste par la liberté de pensée et d'agir en se soumettant volontairement à des conventions sociales ou en s'en soustrayant. Ainsi, le mode de vie sera, par choix, plus ou moins conventionnel, en fonction de l'intention de l'individu et, à ce propos, « l'agentivité » est le concept signifiant « la possibilité d'agir », le fondement du « sujet intentionnel » (Gayon 2020).

Du reste, l'identification peut aussi se faire en fonction de possessions matérielles ou intellectuelles. En ce sens, l'identité de classe dans la théorie matérialiste de Marx souligne l'inégalité d'accès à la propriété. Or, la notion de propriété sous-tend la question de l'appropriation. A partir de quoi puis-je considérer qu'une chose est à moi ? Cela renvoie aux modèles économiques d'une société soit le modèle capitaliste, dont la finalité est de générer des profits, soit le modèle socialiste, dont la finalité est de produire des richesses pour les utiliser, soit le modèle communiste, dont la finalité est de tout mettre en commun, soit le modèle libéraliste, dont la finalité est la libre activité des entreprises, etc.

Cela renvoie aussi aux modalités de fonctionnement de ces modèles par types de gouvernances et à ceux qui ont le pouvoir, (le peuple, démocratie, les riches, ploutocratie, etc.) et officieux (lobbying, etc.). Cela renvoie enfin à la construction des modèles législatifs et judiciaires en fonction de l'expression des droits et des devoirs par des institutions. En sciences sociales, trois types de classes sont aussi cités : l'identité temporelle, culturelle et collective. (Gayon 2020). La première caractérise la permanence d'une classe par la transmission intergénérationnelle. La seconde est caractérisée par des symboles qui permettent de distinguer l'appartenance ou non à un groupe. La dernière ouvre sur la sphère politique du vivre ensemble que l'on a articulé autour de trois sous-modèles (économique et monétaire, gouvernemental, législatif et judiciaire).

Si nous revenons ici à l'objectif de notre thèse, nous avons acquis ici de précieux éléments concernant les sciences qui entendent décrire et explorer le phénomène humain. La spécificité humaine repose en particulier sur le degré d'intelligence qui lui permet de gérer mieux que

d'autres espèces les combinatoires complexes de symboles. Ces capacités sont largement décrites par les neurosciences avec un succès grandissant. Cependant, une explication complète de l'humain doit passer par ce qui fait son identité personnelle. Or, nous retrouvons ici ce que nous avons découvert dans le vivant. Cette identité est liée à des interactions avec des environnements variés et aux fluctuations d'une histoire qui n'ont aucun caractère d'universalité, de régularités, ... et qui ne sont donc pas réductibles en termes de lois de fonctionnement de réseaux neuronaux.

Conclusion du chapitre 3.

Des neurosciences à la philosophie de l'esprit.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la notion d'individuation psychique. Tout d'abord, nous avons évoqué une diversité d'éléments nécessaires au fonctionnement cérébral, les neurones, mais aussi les neurotransmetteurs, qui comprennent de nombreuses substances en suivant en particulier les travaux de Dehaene. Puis, la question de l'accès à la conscience, des niveaux de conscience, nous sommes passés à la question de l'objet de la conscience en évoquant la diversité d'intelligences en suivant la réflexion philosophique de Damasio. Mentionner ce dont on est conscient, la construction de représentations mentales, implique de mentionner aussi que l'on n'est pas conscient de tout, que l'on fait des choses automatiquement et que l'on ne comprend pas parfois comment émerge certaines pensées.

Citer le conscient nécessite donc de citer l'inconscient dans une conception « topique » (Naccache 2009) c'est-à-dire inclusive de l'interaction entre plusieurs types d'organisation (de systèmes complexes). Selon Naccache, « les processus perceptifs inconscients trouvent leur siège dans la totalité des régions cérébrales visuelles » (Naccache 2009). D'où aussi l'idée de rechercher des représentations mentales très abstraites pour montrer la richesse de la vie mentale, et des interactions entre notre cerveau et l'environnement », comme ajoute Galinier. Naccache parle alors « d'inconscient cortical », de la profonde interaction entre conscient et inconscient et de la valeur sémantique d'un mot, un référent symbolique en fonction d'une culture et d'un apprentissage. Citer l'inconscient ouvre sur le « traitement de l'information sans conscience », qui devient un sujet de recherche dans les années 1950 avec « la théorie de l'information (Shannon) et la découverte de mécanismes universels de computation (Wiener, Turing, von Neumann) » qui « influencent profondément la psychologie cognitive », comme le rappelle Stanislas Dehaene (Dehaene 2010). L'intérêt, ici, n'est donc pas tant le fonctionnement

sans conscience que le fait d'être conscient. Certains êtres vivants, comme les humains, possèdent cette faculté particulière de pouvoir être vivant et doté de facultés perceptives, sensibles, et cognitives, représentationnelles.

Enfin, cela nous a conduit à la notion d'individu et à passer de l'individuation biologique à l'individuation psychique. Nous avons compris que l'identité est relative à un sentiment d'appartenance, lui-même relatif à une somme de processus d'intégration à une diversité possible de collectifs, en fonction de besoins et de désirs (appétence). Par cette analyse, nous comprenons bien qu'il existe une multifactorialité dans la construction de l'identité avec des paramètres naturels et sociaux. Qu'en est-il alors de la liberté de l'individu à se construire lui-même face à cette diversité de conditionnements ? Si l'éducation est un facteur de développement individuel et d'émancipation, elle ne doit pas servir qu'à transmettre des connaissances et à former des individus utiles à la société. Elle doit permettre à chaque individu d'exprimer sa singularité. Or, la singularité s'exprime par le sentiment d'appartenance à des valeurs qui feront que mes actions seront guidées par celles-ci. Elles donneront donc un sens à mon histoire de vie.

La psychologie du développement traite notamment des questions des interactions entre l'inné, l'acquis et les modes de développement du comportement. Elle permet d'établir des étapes dans le développement de l'individu du nouveau-né, à l'enfance jusqu'à la puberté, puis de l'adolescence à l'âge adulte. L'identité est donc aussi caractérisée par les âges de la vie, qui comptent des modifications physiologiques, comme la mutation du corps à l'adolescence ou la diminution des capacités avec le vieillissement. En ce sens, l'identité est alors mise en correspondance avec la diversité des capacités à agir, à faire.

L'individu est mu par des émotions et des sentiments et il commence à projeter des états psychiques semblable chez autrui à partir de l'âge de 2 ou 3 ans (Gayon 2020). L'identité est donc relative à l'acquisition de la diversité des facultés sensorielles et cognitives, dont est dotée une espèce. Ces facultés sont nombreuses chez le petit humain, mais aussi lentes à se développer. Par ailleurs, la limitation du développement peut aussi être liée à d'autres facteurs que l'âge : la santé, les contraintes personnelles, professionnelles, physiologiques, éthiques, déontologiques, les restrictions des libertés dans un pays, le manque de ressources pour financer ses projets. En revanche, les possibles peuvent être augmentés par les progrès techniques et technologiques.

Ainsi, il est possible de comprendre ce que je peux faire en fonction de normes naturelles et sociales, qui constituent une diversité de contraintes. Ensuite, à partir de ces contraintes, dont certaines sont durables et d'autres passagères, et qui sont autant de conditions initiales, on est capable d'esquisser une diversité d'actions possibles, ce que je vais faire, c'est-à-dire, ce que je vais générer hors de moi. Cela implique donc un recul face à l'action qui est du ressort de la volonté et cela nous conduit à une réflexion proprement philosophique sur la finalité : « Pourquoi je veux faire cela et comment vais-je le faire ? ». En l'occurrence, pourquoi je veux faire cela dans ma vie, quel est mon moteur ?

Pour conclure, l'inclusion de la volonté dans l'identité est le contraire de l'aliénation, qui fait perdre la possession de soi. Les formes d'aliénation peuvent être multiples, mais elles sont surtout associées à la perte de la raison. En effet, il est nécessaire que la raison fonctionne et ce fonctionnement est relatif à d'autres fonctions, notamment la mémoire. L'identité est dès lors aussi relative à la somme de choix personnels. Or, ces décisions sont prises en fonction de finalités, dans le sens de l'intention et de l'effectivité. Alors, nous allons aborder la question de la finalité, en particulier des sciences, dans la partie suivante.

Mais, auparavant, nous voudrions souligner la diversité de descriptions nécessaires pour comprendre l'émergence de la vie, les formes de vie et les fonctions émergentes dans le vivant, comme le fait de penser. Nous comprenons donc encore ici qu'une seule théorie, dans un seul domaine, ne suffirait pas à décrire tous ces fonctionnements particuliers. Par ailleurs, nous voyons que des questions philosophiques particulières émergent de chaque discipline scientifique. Ici, il est possible de se demander comment on pense, à partir de quel substrat. Toutefois, il est aussi possible de se demander comment se forme la représentation mentale, le lien, et la raison du ressenti qui en émerge. Il sera alors question de l'histoire personnelle, unique, d'un individu. D'autres questions se posent aussi à partir du moment où l'objet d'étude est l'esprit, et un pan de la philosophie lui est consacré, la philosophie de l'esprit, mais aussi à la psychologie philosophique. « Comment cette expérience est possible », cette expérience du « monde vécu », écrit Piaget ? « Invoquer la conscience est loin de suffire », ajoute-t-il en réfléchissant à la construction de la signification. Dans « *Les ambitions de la psychologie philosophique* », il affirme que nous sommes « en présence de la question centrale des relations entre la conscience et le comportement. « Subjectivité incarnée », nous dit Merleau-Ponty » poursuit-il, finissant sur la nécessaire distinction entre la « subjectivité en général » et « la subjectivité personnelle » (Piaget 1992).

Conclusion de la partie II.

Une diversité de modèles explicatifs et justificatifs nécessaires

Dans la première partie, nous avons expliqué les différences entre les sciences formelles et les sciences empirico-formelles dont l'ensemble constitue la diversité des sciences « exactes ». Dans cette seconde partie, nous avons décrit ce qui constitue essentiellement deux disciplines des sciences empirico-formelles : la physique et la biologie. Nous avons montré que chaque discipline repose sur des « élémentarités » différentes. La physique décrit les interactions entre particules et se formalise dans des lois. La biologie décrit le vivant par les composés moléculaires, les structures et les fonctions formant des systèmes complexes. Nous avons identifié une divergence essentielle entre ces deux disciplines concernant l'importance de la notion de fonction dans le modèle explicatif de la biologie.

En outre, la physique, comme la biologie, évolue en fonction d'évolutions conceptuelles et techniques. L'apport de l'informatique et des mathématiques, ont permis l'émergence de nouvelles branches de la biologie comme la biologie quantique ⁴⁶, ou l'ingénierie quantique⁴⁷. Ces nouvelles branches permettent de nouvelles recherches et de nouvelles applications. Au niveau fondamental, la biologie théorique ⁴⁸ est également apparue. Cependant, il n'est pas certain que la physique théorique et la biologie théorique puissent atteindre le même titre d'efficacité explicative car, justement, nous avons vu que l'impréconcevabilité du vivant pourrait bien être la route à une explication ultime du genre de celle des physiciens. Il apparaît que le « tout » est relatif au choix des fondements, en fonction d'un principe conceptualisable. Comme le souligne Kauffman, « le devenir ultime repose (...) sur les fondements, mais il n'est pas déductible à partir d'eux. » (Kauffman 2021).

⁴⁶ Leglu D, "Birgitta Whaley : Percer les secrets du vivant grâce à la biologie quantique", sur *Sciences et avenir*, 7 novembre 2016 (en ligne : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/plantes-et-vegetaux/birgitta-whaley-percer-les-secrets-du-vivant-grace-a-la-biologie-quantique_107763)

⁴⁷ A propos : "Révolutions quantiques : contexte, technologies, domaines d'application, perspective.", sur CEA, juin 2018 (en ligne : <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/CLEFS66-FR-FINAL.pdf>)

⁴⁸ A propos : A. Danchin, "Biologie théorique et philosophie", sur *Normale sup*, (en ligne : <https://www.normalesup.org/~adanchin/AD/ch3.html>)

En effet, le principe de la biologie, qui peut être vu comme la seule loi générale de cette discipline, est l'idée d'évolution et de sélection naturelle, alors qu'en physique on dispose d'un grand nombre de principes systématisés par les lois de la nature. Or, à partir de sa signification de l'évolution en fonction des conditions initiales nécessaires à l'émergence de la vie, la biologie produit des connaissances scientifiques spécifiques. Elle identifie les formes de vie et leurs relations. De plus, elle formalise les processus naturels propres au vivant : cellulaire, génétique, neuronaux, dans un ensemble plus vaste, les systèmes complexes, qui renferment d'autres types de phénomènes, comme les phénomènes sociaux (migration des oiseaux, modes de vie humains, etc.) Or, la base de la complexité est le niveau organisationnel et les fonctions au sein de cette organisation. Ainsi, ce modèle explicatif est différent de celui de la physique. Comme l'écrit le biologiste théoricien Kauffman : « Les physiciens cherchent à simplifier pour découvrir des lois tandis que, pour les biologistes, il s'agit d'étudier la façon dont la vie s'est complexifié. » (Kauffman 2021). Ainsi, en physique, nous obtenons une description globale, simplifiée, donc réductrice. Avec la notion de système complexe, au contraire, nous obtenons une description de phénomènes particuliers, spécifiques, singuliers, ...marqué par l'historicité.

De plus, en biologie, l'accent est mis sur la notion de fonction. Une fonction est « quelque chose qui participe à la survie d'un tout kantien (...) ». (Kauffman 2021). Or, le tout fonctionnel d'un être vivant est son organisme et « l'ordre qui se propage » (Kauffman 2021). correspond à une « clôture entre contraintes » (Kauffman 2021). Ainsi, le vivant est régi par les lois de la physique et aussi par des contraintes propres explicitées par les sciences du vivant comme nous l'avons vu plus haut. La *fonction* d'un système X (un organe, le cœur humain, par exemple) dans un tout T (un organisme, le corps humain) est un sous-ensemble des effets dont X est la cause et qui participe au maintien de la survie et de la cohérence de T. Tous les effets de X ne participent pas au maintien de la survie de T. Par exemple, le cœur humain cause un certain bruit, mais ce bruit n'a pas de rôle dans la survie du corps humain. La question est alors déplacée à celle de l'évolution des fonctions, comment une chose sert à autre chose que ce à quoi elle servait initialement. On y répond en intégrant la notion de situation, mais toutes les situations ne sont pas anticipables.

C'est ici, à la suite de l'analyse originale de Stuart Kauffman, que l'on comprend la différence entre la biologie et la physique. La physique rend compte de tous les effets causaux d'un système, mais elle n'a pas, en elle-même, la capacité de prédire *a priori*, l'émergence d'un sous-ensemble spécifique d'effets causaux de X qui pourrait participer plus tard à la survie d'une totalité T. Pour le dire de manière simplifiée, la physique pourrait décrire tous les possibles, mais n'aurait aucun critère permettant de donner sens à tel ou tel sous-ensemble de causes en

référence à une survie d'un organisme (qui n'est pas encore apparu !). « Pour un physicien, un cœur pompe, agite des fluides, brille, etc. : tout est sur un pied d'égalité. Rien ne « compte » » (Kauffman 2021). Alors que la biologie est cette discipline qui donne spécifiquement du sens à des sous-ensembles causaux. En cela, elle est une discipline qui ajoute quelque chose à la physique et ne s'y réduit pas. Dans une science proprement historique, comme l'est la biologie, ce sont des totalités T qui, dans le futur, donnent sens à des fonctions X vus comme des sous-ensembles d'effets causaux. Mais l'émergence de ces totalités n'est pas entièrement possible a priori. Donc le sens immanent aux fonctions n'est pas effectivement concevable a priori, il est « impréconcevable », comme dit Kauffman.

Ensuite, le vivant est dépendant de son milieu. Il dépend de conditions initiales nécessaires à la vie et d'une diversité de processus naturels ainsi que de modes d'être au monde différents dont certains particuliers : conscients et pensants. Or, des degrés de liberté permettent cette évolution « impréconcevable », dont parle Kauffman dans l'ouvrage *Au-delà de la physique. L'émergence de la vie* (Kauffman 2021). En effet, les probabilités au sens de la physique quantique ne correspondent pas aux probabilités des contextes biologiques spécifiques. D'un côté, nous pouvons caractériser les probabilités d'évolution d'une particule, de l'autre, l'espace des configurations possibles d'un système vivant complexe n'est pas identifiable ainsi qu'une mesure de probabilité les caractérisant, comme nous l'avons vu dans la conclusion du second chapitre de cette partie à propos des systèmes complexes.

Concernant l'apparition du vivant, il s'agit déjà de comprendre le fonctionnement des cellules et des protocellules. Et, comme l'explique Kauffman, « Parvenir à des protocellules à partir d'une terre muette et stérile, c'est déjà beaucoup. Mais la vie actuelle s'appuie sur autre chose encore : l'ADN qui code la production de protéines (...) ». (Kauffman 2021). Il y a donc encore beaucoup de codes à comprendre dans le vivant, comme celui des connections neuronales, et d'articulations à modéliser tenant compte d'une énorme diversité de contraintes.

Nous nous sommes donc concentrés dans le dernier chapitre sur les contraintes liées à l'activité psychique, tant au niveau de ses composants (neurone, neurotransmetteurs) que sur ses effets particuliers : l'état conscient et les objets de l'attention en fonction de la notion de représentation mentale. Cela nous a conduit jusqu'à une analyse de l'individuation psychique en fonction des processus d'intégration générant un sentiment d'appartenance ou, au contraire, un sentiment d'exclusion, de rejet. Avec l'individuation psychique émerge donc deux notions clés : les émotions et les sentiments. En effet, à partir des sensations émergent les émotions,

puis des sentiments, un monde de subjectivité qui consiste à « ressentir le monde, l'évaluer et agir sur lui », comme le synthétise Katherine Kauffman.⁴⁹

Pour comprendre la diversité des processus naturels, pas seulement ceux qui sont simples, il s'agit déjà d'identifier les composés et leur émergence, puis comprendre leur fonctionnement propre. Nous en arrivons donc à la description d'une diversité de fonctionnements, souvent complexes (inorganique, organique, psychique, sociaux). Nous comprenons donc qu'une diversité de disciplines soit nécessaire pour comprendre cet ensemble de processus naturels. Dans chaque discipline se manifeste une unité interne selon un modèle propre expérimental, descriptif, explicatif et justificatif. Cette diversité de disciplines permet de connaître une variété d'ordre de phénomènes et une diversité de processus.

Face à la diversité de branches au sein d'une même discipline et face à la diversité des disciplines, la question de leurs relations se pose, en particulier entre sciences exactes et sciences humaines et sociales. Ces relations se manifestent dans l'interdisciplinarité et la pluridisciplinarité. Céline Surprenant, chercheuse associée au Collège de France, définit l'interdisciplinarité en relation avec des pratiques et en fonction d'une finalité commune : « la collaboration pratiquée et réfléchie entre certaines disciplines » et la pluridisciplinarité d'un point de vue plus organisationnel, par le fait que plusieurs disciplines sont rassemblées en un « corps ». Par exemple, dit-elle, au Collège de France, « des titulaires de plusieurs disciplines en « sciences exactes » et en « sciences humaines » et littéraires confondues y forment un corps » (Morange 2016). Concluons sur le lien entre interdisciplinarité et pluridisciplinarité avec cette phrase de Jean Gaël Barbara, historien et épistémologue des neurosciences : « La pluridisciplinarité est souvent à la fois un commencement et une condition nécessaire de la transdisciplinarité.(...) l'intégration transdisciplinaire est le réel moteur de la science, le principe de la dynamique des disciplines et le créateur de nouveaux objets scientifiques. » 50

En plus de l'interdisciplinarité et de la pluridisciplinarité, citons aussi la multidisciplinarité. Au contraire d'une théorie du tout se constituant à partir d'une seule discipline (monodisciplinarité), une complémentarité est possible par la multidisciplinarité. La multidisciplinarité consiste à mettre en relation des connaissances dans différentes disciplines qui demeurent irréductibles les unes aux autres. C'est ce que nous avons fait, dans la seconde partie, en montrant qu'il existe une somme de processus biologiques qui ne se réduisent pas à

49 Katherine Kauffman citée dans S. A. Kauffman, J. Bambaggi, *Au-delà de la physique*, op. cit., p.120.

50 Cette phrase fût publiée dans un chapitre du livre « La transdisciplinarité : Comment explorer les nouvelles interfaces », sous la direction de Claude Debru, Hermann, Quai des sciences, 2011.

la description physique. Ceci suggère une philosophie intégrative de la diversité des connaissances scientifiques. Plusieurs ouvrages existent dans ce sens. Nous pensons en particulier à plusieurs ouvrages que nous citons comme : *La théorie générale des systèmes*, *Relier les connaissances*, *Théorie quantique et sciences humaines*, *Le zéro et le un*. Ces travaux s'écartent d'une théorie du tout. Chaque discipline garde son autonomie relative et correspond à une description particulière du réel. Mais il existe diverses manières de relier ces disciplines et leurs connaissances, et chacun de ces ouvrages le montre de manière éclairante.

Il est aussi possible d'apporter une analyse épistémologique sur la base d'une diversité d'évolution, d'une part, l'évolution conceptuelle par la constitution de théories scientifiques et d'autre part, l'évolution technique avec la production de nouveaux instruments. L'évolution conceptuelle marque la continuité disciplinaire retracée par l'histoire d'une science. Cette évolution est animée par une quête de vérité, nécessitant une exigence d'objectivité, et plusieurs méthodes s'observent pour y parvenir, comme nous l'avons vu. De plus, l'évolution des savoirs relative à l'évolution des techniques marque la nécessité d'inclure la place de l'histoire des techniques et des technologies dans la croissance des connaissances scientifiques par la construction de nouveaux instruments de mesure et de nouvelles méthodes d'expérimentation. Or, cette évolution caractérise une forme de progrès qui n'est plus déterminée par la quête de vérité, mais par la contrainte des possibles. Cela nous conduit à approfondir ces deux types d'évolutions : D'une part, l'évolution d'un savoir en fonction d'un fondement conceptuel pour cheminer vers une connaissance de ce qui est vrai, d'autre part, l'évolution d'un savoir en fonction de l'usage de toutes les possibilités techniques. Cette analyse amène à constater une diversité de valeurs et une hiérarchisation différente de celles-ci en fonction d'un principe : le savoir pour la science, le faire pour la technique.

Nous touchons ici un problème important qui est au cœur du rapport entre théories et pratiques expérimentales. Peut-on résorber l'aspect expérimental, observationnel et instrumental dans un schéma unifié, ultimement « théorique » ou cet aspect conserverait-il une irréductibilité qu'il conviendrait d'interroger ? L'instrument est une sorte de « théorie incarnée » mais cette théorie peut-elle être résorbé au sein du cadre conceptuel que cet instrument est censé valider ? D'autre part, nous touchons aussi au lien entre science et valeurs. La pensée d'une conception unificatrice des savoirs peut-elle faire l'économie de la subjectivité qu'elle sous-tend et de sa caractérisation, en particulier, par des référentiels de valeurs ? Il est important pour étudier une vision unifiée des sciences et des technosciences, des théories et des pratiques expérimentales de penser le lien aux valeurs et aux finalités qui motivent l'action des scientifiques. La philosophie a ici un apport essentiel.

PARTIE III.

LES FONDEMENTS ET LES FINALITES DES SCIENCES : DE LA REALITE NATURELLE A LA REALITE ARTEFACTUELLE

Introduction de la partie III.

Objectivisation de la réalité naturelle à la réalité humaine.

En analysant le système de la physique, qui décrit l'univers globalement, et le système de la biologie, qui décrit une particularité, le vivant dans l'univers, nous avons montré que la science empirique ne peut pas se passer d'une dimension logique et formelle, si bien qu'on devrait la qualifier de manière plus rigoureuse de science empirico-formelle. En effet, nous avons vu que l'ensemble des processus physiques, biologiques et même sociologiques, peuvent être modélisés par l'association des mathématiques et de l'informatique dans le contexte de systèmes complexes. Nous avons montré l'importance de types de composés à partir desquels émergent ces processus complexes et les limites de cette description : a) les modèles ne sont pas toujours traductibles en lois. b) toutes les formes d'évolutions des fonctions ne sont pas prévisibles et concevables.

En réalité, chaque domaine de phénomènes (physique, chimique, biologique, ...) demande l'introduction d'idées, de concepts nouveaux qui aident à appréhender la spécificité du domaine. Mais rien n'arrive que ces idées structurant les schèmes explicatifs d'un domaine puisse se ramener à d'autres idées structurant d'autres explications. On retrouve un exemple ici de ce que Kuhn appelait l'incommensurabilité des paradigmes. Ces idées ne procèdent pas

d'une connaissance empirique a posteriori et comme le souligne le scientifique Paul Germain, dans sa lettre à Jean Hamburger « l'idéation est plus importante que l'expérience et cette idée est le fondement même de notre abord des problèmes biologiques (...). » (Hamburger 1984) Ceci nous invite donc à poursuivre notre réflexion sur le fondement et les limites de la science. Ces limites nous les trouverons au niveau conceptuel.

Après avoir abordé la limite conceptuelle, nous nous tournerons vers une autre limite, celle de la finalité des sciences : Pourquoi connaître ? En effet, si la science permet de comprendre les processus matériels dans l'univers et, au moins partiellement, les conditions d'émergence du vivant, ses mutations, et ses divers fonctionnements, ces connaissances scientifiques sont également utilisées à d'autres fins que le simple fait de comprendre (encore faudrait-il analyser aussi pourquoi on cherche à comprendre) ce que nous sommes, où nous sommes et comment nous sommes arrivés à exister. L'utilitarisme des sciences pose la question des valeurs qui guident l'action humaine. Nous suivrons donc la réflexion de Blondel sur ce thème et poursuivrons notre réflexion nuancée entre la position philosophique d'Ellul et celle d'Hottot sur le lien entre la science et la technique, ce qui nous amènera à la philosophie de l'ingénierie.

Si la science connaît les processus naturels, elle peut les reproduire et les modifier. C'est ce que nous observons notamment avec les OGM. Initialement, il s'agit d'un « progrès », puisque cela permet de produire plus et de produire des aliments plus résistants. Nourrir une population mondiale croissante conduit aussi à utiliser des pesticides, mais les sols et la biodiversité en pâtissent. Ainsi, nous pouvons nous interroger sur le rapport entre la réalité humaine et la réalité naturelle, par nos actions individuelles et collectives. Nous avons vu la place de la logique et du raisonnement dans l'acquisition des connaissances. Cependant, nous constatons aussi les limites de la raison humaine par l'usage que l'humain fait de ses connaissances et de ses techniques, en particulier par la menace d'une guerre nucléaire mondiale qui détruirait tout le vivant, si rare, lent et difficile à émerger dans ce vaste univers, majoritairement sans vie.

Nous touchons ici la question de l'intention de l'action scientifique. Pourquoi vouloir connaître ? Est-ce dans l'intention de posséder un sentiment de puissance, un pouvoir, un privilège, une forme d'autorité ? La connaissance est-elle animée par un désir de conquête et de domination, comme l'histoire humaine nous l'a révélée ? Pourquoi vouloir connaître ? Seule l'analyse profonde que permet la philosophie peut donner des éléments de réponse à cette question. Elle permet d'identifier un réseau de valeurs avec leur hiérarchie, et leurs rapports entre l'intérêt général et les intérêts particuliers. Aujourd'hui, l'intérêt général semble la préservation de notre planète. La généralité, ici, c'est la survie, relative au maintien des

conditions nécessaires à la vie. Nous avons besoin des propriétés particulières de notre planète, de ses richesses naturelles, de son eau, de son oxygène, de sa terre produisant nos aliments, de son climat pour survivre.

En fait, nous touchons ici à un point délicat qui demanderait d'être débattu en profondeur, c'est le lien entre des sciences, des technosciences aux valeurs et aux déterminants politiques, sociaux et économiques lié à l'histoire de ceux qui produisent les connaissances. Ces facteurs qu'une épistémologie classique considérerait comme externes aux sciences, déterminent des orientations, des motivations des projets de recherche. Mais, certains concepts, certains traits de la terminologie ou certains présupposés majeurs pourraient bien être considérés par ces facteurs externes. Les travaux de Bruno Latour, Isabelle Stengers et de la socio-épistémologie ont jeté un regard nouveau sur cet aspect. Le projet de Bourbaki et sa manière d'envisager l'architecture des mathématiques, l'insistance sur l'incertitude dans la physique de Werner Heisenberg... pourraient refléter des aspects d'une époque et d'une société (celle de la République de Weimar dans le cas de Heisenberg). Alors la question de l'unification des savoirs ne devrait plus seulement être envisagée en restant dans des univers formels, de concepts, de théories, etc. mais aussi en remontant aux volontés et aux intentions dont les connaissances procèdent. Bien entendu, on est loin de l'idée d'une unification formelle auto-suffisante, mais les sciences ne sont-elles pas bien plus que cela ?

CHAPITRE 1.

Une diversité possible de fondements

Introduction du chapitre 1.

La notion de concept.

L'objectif de ce premier chapitre est de montrer l'apport de la réflexion philosophique sur **les fondements de la science** et la variabilité du choix des principes dans une même quête de vérité. A partir de cette description de la diversité des sciences formelles dans la première partie et de la diversité des sciences empirico-formelles dans la seconde partie, la question de l'articulation se pose. Plusieurs positions philosophiques sont possibles. Citons-en quelques-unes. Olivier Sartenaer dans un article à propos de l'ouvrage *Pluralismes Scientifiques* de Stéphanie Ruphy évoque le monisme, le pluralisme à partir de la notion d'émergence ou le pluralisme taxinomique (Sartenaer 2014).

Le monisme conçoit l'élémentarité des choses, l'expression de sa diversité à l'échelle physico-chimique et recherche l'unité sous-jacente à cette pluralité. Il conduit donc à un idéalisme fondé sur un concept unificateur. Le pluralisme conduit soit à s'intéresser aux effets émergents, soit à la taxinomie débouchant sur le nominalisme. Choisir de s'intéresser aux effets émergents rappelle les monades de Leibniz. Une diversité d'élémentarité implique de clarifier la notion d'essence. A ce propos nous renvoyons à l'ouvrage de Godani *Traits : une métaphysique du singulier*.

De plus, il s'agit aussi de qualifier l'émergence soit épistémologique, soit ontologique. L'émergence épistémologique postule « l'existence de propriétés qui, (...) entraînent une certaine rupture épistémologique dans la mesure où elles ne peuvent être approchées adéquatement au travers du prisme exclusif des sciences physiques » (Sartenaer 2018). L'émergence ontologique soutient aussi une « certaine déconnexion par rapport à leurs bases ».

(Sartenaer 2018). Le pluralisme taxinomique est illustré par Stéphanie Ruphy à travers sa spécialité, l'astrophysique. Cette position est interprétée par Olivier Sartenaer comme une forme d'antiréalisme, ou de nominalisme, ajoutant que « les manières de cataloguer les étoiles sont et seront toujours le résultat de conventions dictées par les intérêts épistémiques des astrophysiciens. » (Sartenaer 2014). Précisons alors l'orientation nominaliste. Elle « met l'accent sur le rôle actif du mot qui, en omettant certains caractères de la chose, est un facteur d'attitude mentale abstrayante. Une science se présente, selon une formule fameuse de Condillac, comme « une langue bien faite. » (Vignaux s.d) Ainsi, elle ancre sa pensée plus sur la méthode scientifique, « le style de raisonnement scientifique développé par Hacking. » (Sartenaer 2014). Cette orientation conduit donc à choisir le langage comme principe et oriente vers un autre pan de la philosophie : la philosophie du langage.

Cette diversité de positions philosophiques montre que la science recourt au concept, à l'instar de la philosophie, ce terme est donc à clarifier. Par ailleurs, l'articulation entre concepts relève essentiellement de la philosophie, et non de la science, car le fondement est relatif au choix d'un principe justifié par des arguments, mais qui ne peuvent pas être falsifiés, démontrés comme faux. On ne peut pas justifier logiquement pourquoi on choisit, au départ, de fonder sa philosophie sur une base physico-chimique, sur les effets émergents, ou sur la taxologie. Les trois positions philosophiques sont possibles, soit la première va générer une concentration sur l'évolution d'une discipline, la physique, soit la seconde va évoluer vers la diversité des interactions disciplinaires, soit la dernière va tendre vers les relations entre classes. Pour commencer, clarifions la notion commune de concept et décrivons plusieurs positions philosophiques possibles.

Pour le philosophe Claude Panaccio, les concepts sont les « constituants de base » de pensées telles que les « réflexions », les « croyances » et les « intentions » (Panaccio 2011). Le choix du concept comme « unité de pensée » remonte à Aristote. Selon lui, il s'agit d'une « structure complexe de type propositionnel », puisqu'un concept relève d'une association de termes référant à un ensemble de faits. Par exemple, le concept d'éducation pourra renvoyer à l'ensemble des actions menées pour enseigner des connaissances à un individu, afin de lui permettre de développer son potentiel. Pour Kant, le concept est aussi l'unité de référence renvoyant à la faculté de penser. (Panaccio 2011). Le concept renvoie donc « aux unités d'ordre psychologique », aux constituants de « proposition mentale » pour Guillaume d'Ockham au XIV^{ème} siècle, et à la capacité de représentation en général, au moins pour « la tradition aristotélicienne, le kantisme et la philosophie analytique », comme le souligne Claude Panaccio dans *Qu'est-ce qu'un concept ?* (Panaccio 2011).

La valeur langagière du concept est soit sémantique, syntactique ou épistémologique. (Panaccio 2011). La valeur sémantique est donnée par une correspondance entre un concept et une chose observable. La valeur syntactique correspond à la mise en relation d'un concept avec un ensemble de termes à l'intérieur du langage. La valeur épistémologique est donnée par la fonction explicative du concept. Grâce à ces trois propriétés, on peut prêter un lien entre les concepts et le réel par l'intermédiaire du fait de nommer. Ensuite, il s'agit d'analyser le lien entre les concepts par catégories. La catégorisation est permise en fonction d'un critère d'appartenance. Panaccio précise que les traits qui permettent de construire des catégories renvoient aux « phénomènes de typicalité » (Panaccio 2011). En somme, la caricature qui permet d'identifier quelque chose sert de base descriptive, ou de catégorisation cognitive, celle-ci, sur proposition de Eleanor Rosch, est appelée « prototype », dans la théorie du même nom au vingtième siècle. (Panaccio 2011).

Les concepts sont donc les briques élémentaires du « langage de la pensée » (Panaccio 2011). et la catégorisation relève du discernement de ce qui appartient ou non à un ensemble. Elle consiste donc à différencier et à signifier la différence. Il est alors possible de s'interroger sur la finalité du fait de différencier. La différenciation engendre parfois, non pas une articulation, mais une hiérarchisation, des essences à l'essentiel. Ainsi, il est possiblement attribué une primauté de l'un sur l'autre. La différenciation, et finalement le langage, engendre le jugement et des étiquettes sur les choses. Cela interroge donc l'intention du fait même de nommer.

Or, la finalité de l'association entre concepts, la conceptualisation, peut permettre à une idée de rejoindre le réel. Ainsi, la pensée conduit à l'action et potentiellement à transformer le monde. Cela pose des questions aussi sur l'émergence des idées et renvoie à une autre faculté : l'imagination. Mais, toutes les idées ne se rapportent pas au réel et à force d'abstraction, on peut construire un mode idéal, qui n'a plus de correspondance avec le réel, concret et observable. Cela nous invite à examiner les influences platonicienne et leibnizienne dans la philosophie des sciences, qui nous conduiront à revenir à la réalité humaine en suivant les traces de Blondel et en interrogeant le matérialisme contemporain.

1. L'idéalisme, l'idée comme fondement : l'influence platonicienne.

La cosmogonie de Platon présentée dans *le Timée* fait écho aux notions fondamentales de la science contemporaine et, plus particulièrement, aux mathématiques, qui expriment les lois de la nature. De plus, la conception platonicienne apporte une conception originale, où l'univers est décrit comme un tout par une métaphore qui l'assimile à un grand vivant. Il est aussi novateur dans sa conception des places égalitaire de l'homme et de la femme dans la société : « on devrait (...) leur donner des fonctions communes (...) tant à la guerre qu'en toute circonstance ». L'œuvre philosophique de Platon est complète, car elle aborde la connaissance et sa métaphysique de l'univers, les relations politico-sociales entre individus, et l'esthétique à travers des relations entre valeurs. Nous allons nous intéresser à la première dimension à savoir l'explication de l'univers, de son origine et de ses fondements.

Tout d'abord, le *Timée* propose de distinguer ce qui « existe de tout temps sans avoir pris naissance » de ce qui naît, donc apparaît. Le premier correspond à ce qui est invariant et intelligible, « compris par la pensée et produit une connaissance raisonnable. » (Platon 2010), et donc objective. Le second est ce qui est descriptible par les sens et produit des opinions donc subjectives. Il est intéressant de noter que Platon nomme l'artiste comme celui qui cherche « l'immuable ». (Platon 2010). Les vocations de l'art changent à travers les siècles, mais l'une d'elles consistait à représenter les dieux et à copier le réel, et non pas à dépeindre des paysages émotionnels, quotidiens, ou d'être le terrain où se manifeste l'imaginaire, comme l'art se manifeste le plus généralement à présent.

Par ailleurs, Platon insiste sur le fait qu'il n'y a pas d'effet sans cause et que la cause précède l'effet. Nous savons déjà qu'un tel raisonnement conduira au problème de la cause première et au choix d'un principe. Platon fait mention du « père de l'univers » pour solutionner ce problème, « suprême ordonnateur » qui « fit sortir l'ordre » d'une réalité primordiale, la « Khôra ». C'est ainsi que l'ordre de la mise en œuvre de l'univers passe par une « intelligence », et par le plan de développement de « l'intelligence dans l'âme », où l'âme est le moteur du mouvement, ce qui anime, puis « l'intelligence dans le corps », où le corps est pensable comme tout ce qui est matière. Ainsi, l'univers est, pour Platon, ressemblant à celui qui le conçoit. (Platon 2010).

Ensuite, l'univers est comparé à une totalité ontologique : un « être dont les autres êtres pris individuellement et par genres sont des parties, et qui comprendrait lui-même tous les êtres intelligibles, comme ce monde comprend et nous-même et tous les êtres visibles. » (Platon 2010). Puis, il pose la question de savoir s'il y a un ou plusieurs univers, ce qui n'est pas sans faire penser à la cosmologie contemporaine. Il répond qu'il n'y en a qu'un, non pour une raison

de simplicité digne du Rasoir d'Occam, mais parce qu'un autre univers « serait une copie » et l'univers conçu par un créateur parfait ne réalise, selon lui, qu'une création unique. (Platon 2010). La perfection est donc associée par Platon à l'unicité caractérisée par l'originalité, l'authenticité. Aujourd'hui, si l'idée de copie est évoquée dans la cosmologie contemporaine de Tegmark, elle n'est pas ce qui caractérise le multivers de Smolin, où chaque univers serait caractérisé par des lois différentes selon l'idée de sélection naturelle adaptée à la cosmologie. (Smolin 2014)

En outre, Platon explique l'origine des états de matière par des considérations géométriques. La Terre est associée au solide et serait constituée d'une multitude de cubes. L'eau est associée au liquide, état fait d'un grand nombre d'icosaèdres réguliers. L'air est associé au gaz et le feu au fait de multitudes de tétraèdres. Puis, il ajoute une description du monde, associée à la forme du dodécaèdre. L'utilisation par Platon des 5 polyèdres réguliers (convexes) étudiés par le Théétète est remarquable. Non seulement, elle préfigure une théorie des « particules élémentaires », mais elle les associe à des objets doués d'une grande symétrie, ce qui ne manque pas d'impressionner l'un des grands physiciens contemporains : Werner Heisenberg. (Cf. *Inventer l'univers*, et *La partie et le tout*.)

La composition de l'âme du monde est également associée aux formes géométriques, un ensemble de sept cercles espacés tournant à des vitesses variées et contraire, signifiant déjà une association entre espace, forme, temps, vitesse. Il ajoute d'ailleurs que « le temps a donc été fait avec le monde ». De plus, dans l'âme, il n'y a que des formes géométriques et des mouvements quantifiables par une diversité d'accélération et de direction (Cela fait penser au spin et au vecteur). L'âme est donc conceptualisable, mais « invisible » et elle « participe de la raison ». (Platon 2010) Ainsi, l'intelligence en l'âme règle la construction du corps de l'univers et habite la matière qu'elle anime. Par ailleurs, il est intéressant de suivre les descriptions détaillées que Platon donne de la structure de l'âme du monde. Celle-ci est liée à la théorie des proportions arithmétiques et des « médiétés » (des moyennes) qui à leur tour sont liées à la musique pythagoricienne. L'association de l'harmonie du monde à l'harmonie musicale fut aussi mise en correspondance par d'autres philosophes. Et, Jean-Philippe Uzan dans *L'harmonie secrète de l'univers* indique que cette « tradition musicale, astronomique et cosmologique » connaît son apothéose dans l'œuvre de Kepler : *Harmonices Mundi* (L'Harmonie du monde) en 1619. (Uzan 2019).

Pour revenir à l'apport de Platon, nous voyons que celui-ci pense la mise en ordre du monde comme une constitution d'un ordre mathématique, à la fois géométrique (les polyèdres pour les

corps du monde) et arithmétique (les proportions pour l'âme du monde). Platon dit en fait explicitement que le Démonstrateur introduit dans la Khôra des proportions (analogia) et des symétries (symmetria). Puis, il en vient à la description des planètes connues, dont le soleil, aussi considéré comme une planète à l'époque. Ensuite, on peut comprendre qu'il réalise une distinction entre les vivants selon leur milieu d'existence : divin pour les dieux, aérien pour les « animaux ailés », aquatique pour « ceux qui habitent dans les eaux », terrestre pour « ceux qui marchent sur la terre ». L'espèce divine, « la plus resplendissante », de « forme ronde » comme « l'univers », est composée de « feu ». Ensuite, il ajoute leur possibilité motrice soit circulaire, soit en avant, préfigurant la description cinématique des formes de mouvements. Puis, il décrit la mythologie de l'époque, comme un récit transmis par des personnes se proclamant descendants de ces dieux, en ajoutant qu'elle n'est pas appuyée « de raisons vraisemblables ou certaines ». Puis, il en arrive à la nature humaine, où par « une loi fatale, les âmes seront unies à des corps ». En outre, il donne pour finalité de la vie d'être une épreuve durant laquelle il s'agit de s'améliorer afin d'atteindre après sa mort « l'astre qui lui a été échu », à l'âme individuelle. (Platon 2010). Le *Timée* de Platon est donc un récit mythique de l'univers, une cosmogonie qui permet de comprendre des archétypes de la pensée humaine que l'on retrouve à travers les disciplines scientifiques. Aussi, le mythe dit quelque chose de la profondeur humaine que le langage scientifique ne permet pas de formaliser entièrement. Ainsi, les deux sont nécessaires.

Dans *La Science et l'âme du monde*, le philosophe Michel Cazenave évoque ces deux modes de récits différents, dont l'un est rationnel, objectif, et l'autre subjectif, relatif à des archétypes. Comme le souligne Michel Cassé dans la préface de ce livre, l'auteur déplore le fait que des scientifiques négligent le discours méta-scientifique et que des philosophes négligent les connaissances scientifiques. D'ailleurs, Cazenave termine en disant qu'on peut faire de la science théorique, ou de laboratoire, sans s'intéresser à la philosophie et philosopher sur des concepts sans intégrer la connaissance rationnelle et objective produite par les sciences. Mais il semble assez incomplet de philosopher en ne se référant qu'à des courants de pensées philosophiques, qui n'intègrent pas les connaissances scientifiques, la philosophie de la connaissance, et l'articulation entre les connaissances par l'épistémologie.

Or, pour traiter de ces questions, il faut connaître le récit des disciplines scientifiques, le point initial de la discipline, tant par l'objet que par l'apport des connaissances acquises par d'autres disciplines qui lui seront utiles, la variabilité, les éventuels paliers et le point final de l'objet, à partir duquel il disparaît. Par exemple, il semble que parler de l'existence sans connaître et mentionner la description scientifique de la vie pour l'en distinguer est une réflexion

incomplète, notamment par le fait qu'on ne peut pas exister sans vivre. Aussi, cela permet de comprendre que la philosophie de la physique traite de la réalité et non de l'existence. De plus, cela permet aussi de distinguer les diversités ontologiques par les modes d'être. Cela permet donc de poser les bases variées des réflexions métaphysiques (Takho 2015). En outre, comme l'a écrit Cazenave : « le refus de la métaphysique est un choix métaphysique ». (Cassé, Cazeneuve 1996). Alors, la métaphysique des sciences se sert pour construire ses connaissances, de ce que les sciences suscitent comme questions auxquelles ces dernières ne peuvent répondre.

Pour conclure, nous voyons que Platon annonce clairement des caractéristiques fondamentales de la physique classique et des sciences contemporaines : la mathématisation ! L'ordre qui en fait du monde un « Cosmos » est construit et compris sur la base de concepts mathématiques géométriques (donc pas seulement de l'ordre du nombre, de la quantité !) et arithmétiques, mais aussi de l'élémentarité (le fait que la totalité peut se réduire en composants élémentaires qui l'explique et l'explicite). Cependant, nous comprenons aussi les limites de l'idéalisation, qui peut conduire à vouloir construire une totalité à partir de ce principe. De plus, nous voyons aussi, par le rapport au mythe, le rapport à un discours explicatif du Cosmos qui tend à sortir du phénomène et du formel pour les poser sur le fond d'un même discours (d'une métaphysique). Or, une explication scientifique ne doit pas satisfaire que par son formalisme, elle doit apporter une preuve matérielle, observable, de la véracité de cette explication. Sinon, il s'agit, en effet, d'une méta-physique.

2. L'essentialisme, l'élémentarité comme fondement : l'influence leibnizienne.

Dans la philosophie leibnizienne, nous retrouvons une pensée de l'élémentarité définie dans le cadre métaphysique de la monadologie. Intéressons-nous donc à la question de la Monade, « atome métaphysique sans porte ni fenêtre », mais qui constitue le fondement des réalités ordonnées mathématiquement (par le biais de l'idée « méta-physique » du dieu calculateur de Leibniz.)

La Monade pour Leibniz est « une substance simple, qui entre dans les composés ; simple, c'est-à-dire sans parties » (Liebniz 1995). Puis, il ajoute, « Or là, où il n'y a point de parties, il n'y a ni étendue, ni figure, ni divisibilité possible. » Cela renvoie à la pensée atomiste en quête du niveau insécable. D'ailleurs, il poursuit que ces monades sont « les Atomes de la Nature, et

en un mot les *Éléments des choses* », donc les essences.⁵¹ Ainsi, nous voyons une correspondance possible et lointaine dans cette description avec celle de la description du modèle standard des particules. Mais les deux ne s'identifient pas, parce que la monade est « méta-physique », uniquement conceptuelle. Par contre, il ajoute qu'« il n'y a aussi point de dissolution à craindre ». (Liebniz 1995). Et, son intuition est juste et pourrait évoquer ce que nous avons appris des constituants fondamentaux de la matière, mais bien-entendu, en se préservant de l'identification que nous venons de mentionner, quand il exprime :

- a) La nécessité de création de ces éléments qui est exprimée en termes d'interaction de forces.
- b) L'impossibilité de connaître depuis l'intérieur de ces monades.
- c) La nécessité de qualifier ces éléments pour qu'ils puissent être considérés comme des entités.

Par ailleurs, Leibniz apporte une analyse purement philosophique en percevant dans ces entités une « perfection » permettant de les qualifier d'« entéléchies ». De plus, il n'hésite pas à y voir un trait d'« âme », si l'âme est ce qui correspond à tout ce qui a « perceptions et appétits ». (Liebniz 1995).

Cependant, il ajoute que ces caractéristiques sont relatives au « sentiment », qui n'est pas simple. Il préfère donc s'en tenir au terme de « Monades » ou « Entéléchies ». Il est aussi saisissant de voir la correspondance dans la description de Leibniz avec les modes de justification scientifique relatifs soit aux sciences formelles, par démonstration, soit aux sciences empirico-formelles, par la relation entre expérimentation et explication équationnelle. En effet, il synthétise cela par une logique fondée sur la vérité, le principe de la non-contradiction, et le fait que les vérités sont soit prouvées par le raisonnement ou par les faits. (Liebniz 1995).

En outre, il ajoute que « l'Essence renferme l'Existence » (Liebniz 1995). Cette justesse du choix du verbe permet de passer outre les débats philosophiques qui suivront sur l'antériorité ou non de l'essence dans la philosophie existentialiste. En effet, Leibniz insiste par cette affirmation sur le facteur déterminé de l'être vivant en consonance avec nos connaissances en génétique du développement programmé, qui décrivent comment est programmé depuis le stade embryonnaire la place des organes et le codage de leur développement. Ainsi, cette parole philosophique résonne d'une manière étonnante avec la connaissance scientifique, plusieurs siècles avant la découverte de ces fonctionnements biologiques.

⁵¹ Pour un approfondissement de la notion d'essence, nous renvoyons à P. Godani, *Traits : une métaphysique du singulier*, PUF, 2020.

Ensuite, il en vient à l'unité primitive. Or, l'origine ne peut pas être pensée scientifiquement, puisque l'explication causale renvoie à une autre et cela à l'infini, de sorte qu'une description des interactions entre les forces premières et fondamentales dans l'univers n'explique pas le fait même que ces forces existent. En outre, l'hypothèse que tout apparaît de rien ou *ex nilo* (dans le sens d'un néant absolu) n'est pas tenable d'un point de vue logique, puisque le « rien » serait alors quelque chose ayant la capacité même de faire surgir quelque chose. Ainsi, l'origine, la cause première qui fait que quelque chose dépasse l'entendement et ne peut être expliqué par la science, qui ne peut justifier que de rien apparaisse quelque chose. D'ailleurs, le vide des physiciens, lui-même n'est pas rien, mais un état fondamental source de fluctuations et de particules virtuelles. La réponse n'est donc pas dans la physique quantique, qui traite des probabilités, et elle n'est pas non plus dans la cosmologie, puisque nous avons vu que postuler « l'avant big-bang » suggère de penser quelque chose, un état qui engendrerait l'espace-temps-matière. Mais cet état devrait lui-même être supposé exister, la physique ne pouvant jeter une lumière radicale sur la source de son existence elle-même. La physique ne nous donne accès qu'à ce qui est observable et elle n'explique ce qui existe que par un existant chronologiquement ou logiquement antérieur. Si la question de l'origine même de l'existence n'est pas à portée de la science, par contre, elle est envisageable par la philosophie.

Dans la philosophie de Leibniz, il est postulé que « La source de tout, puis la connaissance, qui contient le détail des Idées, et enfin la Volonté, qui fait les changements ou productions selon le principe du Meilleur » est surnaturel et « en Dieu ». (Liebniz 1995). Bien-entendu, ce dieu de Leibniz s'identifie à un dieu calculateur. Si Laplace n'a pas eu besoin de l'hypothèse de Dieu pour décrire son « Système de Monde », il s'avère que pour expliquer que quelque chose existe, en l'occurrence l'univers et ce qu'il contient, cette hypothèse n'est pas à exclure d'un point de vue logique. Par contre, penser que ce qui existe est le meilleur semble peu justifiable. En effet, le sens de « meilleur » est équivoque et subjectif. Il sera d'ailleurs l'objet de raillerie de la part de Voltaire dans *Candide*. Il est certes difficile de voir le meilleur du monde dans celui que nous habitons par le fait même, par exemple, que la mort nous sépare de ceux que nous aimons. Si cette assertion dépasse la raison, il faut la mettre en perspective avec les croyances religieuses de Leibniz, qui considère sans doute que la vie se poursuit autrement après la mort, comme le propose le dogme chrétien. Et, la théodicée de Leibniz considère simplement que la notion de mal est relative à l'irrationnel, et donc incompréhensible.

Pour conclure, un autre élément de la Monadologie est à remarquer dans sa considération du vivant. A l'opposé de Descartes, qui sans doute n'avait pas vécu avec les animaux pour en

parler ainsi, les considéraient comme des machines, Leibniz pense « qu'il y a dans le fond la même chose dans tous les vivants et animaux ». (Liebniz 1995). En cela, il préfigure aussi notre connaissance scientifique d'un fondement commun, la cellule, et des facultés sensibles, communes aux différents règnes, cette sensibilité, dont traite aussi Damasio. (Damasio 2021). Puis, il distingue ces facultés de celles cognitives, qui permettent « de connoître le système de l'Univers » (Liebniz 1995), dont notre espèce est pourvue avec un haut niveau d'abstraction. D'un point de vue épistémologique, il est donc surprenant de voir comment la description philosophique de la Monade peut correspondre analogiquement avec la pluralité des connaissances scientifiques. D'un point de vue ontologique, comme dit Leibniz, qu'il y ait quelque chose et non pas plutôt rien demande une réflexion qui transcende largement le champ empirico-formel.

Ainsi, la description leibnizienne scinde les choses en éléments simples, les monades, d'une part, et les composés, d'autre part. La relation quantitative et qualitative est établie sur le fait que l'unité est simple et la pluralité est composée. Il s'agit donc d'une méthode de réduction selon le degré de complexité et la complexité est signifiée ici par la composition. Pour Leibniz, le graphe d'une fonction est l'analogue mathématique de la loi de l'extérieur qui organise les monades (analogues des points du graphe) pour en faire un tout avec une certaine unité. Les monades sont « sans portes ni fenêtres » et ne peuvent expliquer, par elles-mêmes, l'unité des totalités dans lesquelles elles sont plongées. Leur unité nécessite une explication qui va au-delà d'elles-mêmes. Enfin, nous retrouvons ici une source d'inspiration pour notre réflexion qui montre les limites d'une description qui réduit tout aux éléments, car la détermination d'éléments est elle-même conceptuelle et relève d'une activité mentale qui renvoie aux facultés cognitives.

3 .Le pragmatisme, l'action comme fondement : l'apport de la pensée Blondélienne.

Nous avons abordé la pensée de Platon, puis la perceptive de Leibniz en montrant comment la physique ouvre sur une pensée métaphysique via les analogies du Timée et de la Monadologie. A présent, nous allons montrer une autre voie d'accès de la science à la philosophie, celle que Maurice Blondel a ouverte à partir d'une analyse profonde de l'Action. Il se fait que Blondel était aussi un lecteur attentif de Leibniz et pour le Maître d'Aix, ce qui fait l'unité entre les monades leur *vinculum substantiale* n'est autre que l'action. Blondel a rédigé sa thèse annexe (latine) de 1893 sur le *vinculum* en reprenant une discussion entre Leibniz et le Père jésuite

Desbosses sur ce qui faisait le lien (*vinculum*) entre les monades d'un être vivant. Nous voyons donc ici la proximité avec notre analyse. Dans ce passage, nous allons présenter l'apport de l'analyse philosophique de Maurice Blondel sur la philosophie réductionniste, qui exprime les limites internes des connaissances scientifiques, de la logique et de l'apport de la philosophie.

Tout d'abord, Blondel remonte aux sources de toute action humaine : action physique, action de pensée, ... Suivre et analyser ce qui est impliqué dans les exigences de l'action, voilà ce à quoi nous convie le Maître d'Aix. Chez Blondel, l'action est une dynamique profonde qui meut la volonté et l'intelligence et dont la mise en évidence permet justement de critiquer la réduction scientifique à du pur formel ou à des objets. L'action est ce qui soutient la vie de la pensée et de l'agir et non un concept dans un langage formel. Dans son livre, *l'Action*, Blondel montre que toute notre vie (intellectuelle, pratique, spirituelle) est soutenue en profondeur par une dynamique justement qu'il appelle l'action et que l'on peut mettre en évidence en voyant que la « volonté voulante » (celle qui nous pousse à penser, à parler, à agir...) déborde toujours la « volonté voulue » (celle qui réalise des tâches ici et maintenant). (Blondel 1937).

Dans l'action même de vouloir, il est possible de distinguer l'objet de la volonté par exemple connaître, la méthode réalisation de cette volonté, ici la production de la connaissance (comment j'acquière cette connaissance) et la connaissance elle-même (ce que je connais, l'information acquise.) Par exemple, les scientifiques produisent des connaissances par une méthode et ils transmettent leurs connaissances à ceux qui veulent les connaître. Mais, ceux qui veulent les connaître ne peuvent pas toujours les comprendre, car elles sont formulées dans un langage qu'il est parfois nécessaire de traduire. Ainsi, il est nécessaire de distinguer aussi l'explication de la compréhension. En effet, on peut expliquer et ne pas être compris et ne pas expliquer et l'être. Par exemple, si je sais qu'une personne n'a pas mangé pendant plusieurs jours, je saurai qu'elle a faim, sans qu'on me l'explique. Ce savoir relève de l'expérience et non d'une science. Savoir interpréter les émotions n'appartient pas non plus totalement au savoir scientifique. Ce n'est pas cette méthode qui fait comprendre à une personne qu'une autre est triste en la voyant pleurer. Or, la critique que Blondel fait des sciences traite de l'impossible réduction de tout le savoir au savoir scientifique. En effet, si le savoir est un ensemble de connaissances, le savoir n'est pas forcément scientifique, car il existe des types de connaissances variés. Il peut s'agir d'un savoir technique lié à une activité, à une pratique, comme savoir marcher, danser, skier ou utiliser un ordinateur. Nous allons donc examiner cette œuvre où la dimension anthropologique et l'expérience de l'existence, viennent transcender celle de la connaissance scientifique théorique.

Tout d'abord, si pour le chrétien et étudiant Blondel, « le christianisme est une vie avant d'être une théorie. »⁵², l'action devient un sujet de réflexion dans le sens où il l'associe à « l'homme tout entier comme synthèse en marche » (Blondel 1937). C'est pourquoi, il consacre à ce sujet sa thèse de doctorat intitulée « L'Action. Essai d'une critique de la vie et d'une science de la pratique. », qu'il soutient en 1893. Puis, il reprend et augmente ce travail initial sur l'Action vers la fin de sa vie, en 1937. Le concept d'action, pris dans le référentiel de la vie humaine, implique de le penser en relation à son auteur. L'action est donc relative au verbe qui détermine ce que fait le sujet. L'action de vivre. Elle sous-tend alors un début et une fin. En ce sens, on peut dire que l'action est finie. Cela oblige Blondel, dialectiquement, à penser le rapport à l'infini. Au sens mathématique, il existe une pluralité d'infinis, dans la conception philosophique aussi, en fonction de son opposé, le fini. Si l'infini peut être associé à l'espace absolu, il peut l'être à un autre concept que Blondel utilise, le « surnaturel », qui implique donc de penser un au-delà du naturel.

Afin de penser le naturel, Blondel traite de la raison. Selon lui, la raison « tire des significations de ce qui est d'abord vécu, agi et contraint. » (Blondel 1937). Elle relève de l'expérience charnelle, émotionnelle, des ressentis et donc de la subjectivité, mais elle tente de s'en extraire. Par cette définition, comme l'écrit Trouillard dans son analyse de l'œuvre, le danger réside « dans une certaine dissolution de la raison qui, n'ayant plus de norme ni d'arêtes précises, se flatte de tout accueillir, alors qu'elle n'a plus de prise. L'influence de Blondel est dès lors menacée, non plus par le rationalisme, mais par les facilités de l'irrationalisme. »⁵³ Pour éviter cela, il est nécessaire de traiter de la question de la connaissance produite, justement, par l'association de l'expérimentation et de la raison, qui se distingue des croyances par son caractère objectif, prouvable et invariant.

Blondel s'intéresse donc à la production de la connaissance. Puis, il en donne les limites. Pour cela, il analyse la méthode scientifique qui la produit. La méthode scientifique illustre l'action dans la pluralité de ses dimensions intellectuelles, par la théorisation, et manuelle, par l'expérimentation, relatives aux deux facultés humaines, abstraite (conceptualisation), et concrète (perception et manipulation). Cette double faculté humaine, de penser (abstraction), et d'agir, concrètement, révèle une dualité interne aussi à la méthode scientifique qui empêche d'argumenter en faveur d'une réduction de toutes choses à la physique par l'action même qui produit cette science, la pensée humaine.

⁵² J.Trouillard, « Blondel Maurice - (1861-1949) », dans *Encyclopédie Universalis*, (en ligne : <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/maurice-blondel/>)

⁵³ *Id.*

De plus, par la méthode scientifique, il est possible de décrire des phénomènes naturels et de les prédire à cause de leurs régularités. Cette méthode produit donc non des actes, même si par la suite ces connaissances permettent des applications, mais des informations, des données, transmises dans un langage. Ainsi, les connaissances scientifiques révèlent une partie invariante dans la nature, des processus et des objets observables que l'on peut connaître et manipuler. Mais cette connaissance est produite par autre chose que la matière sur laquelle ces expérimentations sont faites et qu'elle décrit en physique et chimie. Elle est produite par le raisonnement, dont la cohérence entre les informations communiquées dans la théorie avec la réalité extérieure est vérifiée selon un protocole expérimental. Enfin, la vérification de cette adéquation est aussi une activité mentale et la distinction entre ce qui est prouvé, la connaissance, et ce que l'on pourrait en penser, l'interprétation philosophique, relève aussi du raisonnement. Il existe donc, d'une part, la matière, que l'humain manipule et expérimente, concrètement, et une pensée, abstraite, qui la nomme, la décrit, la conceptualise, classe, interprète par un langage et une logique.

Si les scientifiques en physique et en chimie décrivent la matière, ils ne décrivent pas la pensée qu'ils utilisent, pourtant, pour décrire la première, par l'usage de concepts et du raisonnement aboutissant à une théorie. Ainsi, Blondel pose un argument contre une philosophie réductionniste, qui n'inclut pas la raison à laquelle pourtant elle recourt, le fait de comprendre, de l'entendement, de « l'expérience directe » . (Blondel 1951) En effet, la quête d'une théorie unificatrice en science physique propose que tout ce qui est soit réductible à une seule théorie physique, oubliant qu'une théorie est une production intellectuelle humaine qui utilise la raison, l'abstraction, dont le fondement renvoie à autre chose que la seule matière décrite dans les formalismes de la physique.

Un pont est fait entre la physique et les sciences humaines par Michel Bitbol dans *Théorie quantique et sciences humaines*. (Bitbol 2009). Il s'agit d'un pont conceptuel autour de la notion de probabilité, qui ouvre sur la question de la prise de décision. Cela est intéressant et novateur, dans le sens où l'indéterminisme dans la Nature est mis en lumière à l'opposé de la physique classique qui insiste sur les lois de la Nature et donc sur la stabilité des ordres de phénomènes, des processus naturels. Cependant, ce lien conceptuel, intéressant et argumenté d'éléments mathématiques, ne suffit pas à articuler l'ensemble des connaissances dans une discipline, la physique (puisque la loi de probabilités n'est pas l'unique loi de la physique), l'ensemble des connaissances des neurosciences cognitives et l'ensemble de toutes les autres disciplines.

Suite à cette introduction relative au problème scientifique dans sa pratique, rationnelle, qu'elle ne permet pas de fonder, voyons à présent à partir de la rédaction de la thèse de Blondel, le raisonnement qui se rapporte à notre sujet. Dès les premières lignes, il annonce sa volonté de sonder la science pour trouver un sens et interroger le déterminisme, ou non, des choses :

« Oui ou non, la vie humaine a-t-elle un sens, et l'homme a-t-il une destinée ? (...) J'apprendrai peut-être si, oui ou non, ce fantôme que je suis à moi-même, avec cet univers que je porte dans mon regard, avec la science et sa magie, avec l'étrange rêve de la conscience, a quelque solidité. » (Blondel 1951).

Puis, il indique en ces termes, la finalité philosophique de cette thèse : « Il est bon de proposer à l'homme toutes les exigences de la vie, toute la plénitude cachée de ses œuvres, pour raffermir en lui, avec la force d'affirmer et de croire, le courage d'agir. » (Blondel 1937). Pour cela il procède, tout d'abord, par une analyse du fait d'être vivant en s'observant lui-même : « A consulter l'évidence immédiate, l'action, dans ma vie, est un fait, le plus général et le plus constant de tous, l'expression en moi du déterminisme universel ; elle se produit même sans moi. » Ce premier fait permet de conclure que vivre est indépendant de notre volonté. Nous sommes déterminés pour vivre, nous sommes condamnés à la vie, comme il l'écrit plus haut. (Blondel 1937).

Après avoir observé cette première action, celle de vivre, il en vient à la contrainte d'agir : « L'action m'apparaît souvent comme une obligation » et à la liberté du choix de l'action qui implique une détermination et qui « retranche une infinité d'actes possibles. » (Blondel 1937). Ainsi, il introduit l'idée de volonté et de son absence en relation à la conscience et à la réalité extérieure : « Il y a quelque chose en moi ou hors de moi qui agit sans moi ; et ce qui agit sans moi agit d'ordinaire contre moi. » (Blondel 1937). Pour Blondel, le « moi » est donc l'expression de la volonté manifestée dans la détermination de choix d'actions. Bien-sûr, nous ne traitons pas dans cette thèse de certaines questions philosophiques que Blondel soulèvent et qui sont hors de notre sujet. Il s'agit de traiter de la distinction entre connaissance scientifique et interprétation philosophique. Et, Blondel contredit la philosophie réductionniste qui se trouve derrière la quête d'une théorie que l'on nommerait aujourd'hui du tout, en montrant les limites et la dualité de la pratique scientifique.

Blondel analyse la pratique scientifique en ces termes :

« De quelle façon, dans l'étude de la réalité, les méthodes vraiment scientifiques procèdent-elles ? Elles excluent toutes les fausses explications d'un fait, toutes les coïncidences fortuites, toutes les circonstances accessoires pour mettre l'esprit en face des conditions nécessaires et suffisantes, et le contraignent à affirmer la loi : c'est cette voie indirecte qui seule est celle de la science, parce que, partant du doute et éliminant systématiquement toute chance d'erreur et toute cause d'illusion, (...) » (Blondel 1937).

Dans ce passage, il présente donc la supériorité de la méthode scientifique à d'autres modes de raisonnements. Mais il nomme aussi ses limites :

« Dès lors la vérité s'impose, elle est démontrée. (...) Du moment où je pose le problème théorique de l'action et où je prétends en découvrir la solution scientifique, je n'admets plus, au moins provisoirement et à ce point de vue différent, la valeur d'aucune solution pratique. (...) Ainsi, pour que le problème de l'action soit posé scientifiquement, il faut qu'on n'ait ni postulat moral, ni donnée intellectuelle à accepter. » (Blondel 1937).

Ce passage montre le problème fondamental de la méthode scientifique qui relève de l'action humaine. Or, cette action humaine est accompagnée par un raisonnement. Il se pose donc la question de la dualité entre l'agir et la pensée. L'agir de l'expérimentation a lieu pour valider ou invalider une théorie, une pensée. Elle s'intègre donc dans un processus conceptuel. L'action expérimentale scientifique est finalement déterminée par l'action intellectuelle. Elle est même impulsée, tant dans son protocole que dans la production d'instruments, par une action cognitive que Blondel résume ainsi : « L'action, c'est un système de mouvements spontanés ou voulus, un ébranlement de l'organisme, un emploi déterminé de ses forces vives, en vue d'un plaisir ou d'un intérêt, sous l'influence d'un besoin, d'une idée ou d'un rêve. Rien de plus ; (...) » (Blondel 1937). L'agir est donc déterminé par la volonté. L'auteur poursuit sur cette idée dans son chapitre intitulé « comment on prétend faire du néant la conclusion de l'expérience » (Blondel 1937). La question des résultats se pose donc en rapport à l'intention donnée dans l'hypothèse et par la pratique expérimentale. Aussi, il met en garde contre le dualisme émergent de la distinction entre les spéculations intellectuelles et la pratique :

« Ça a été le grand œuvre de la Philosophie Critique de mettre en lumière les conflits de la raison spéculative avec la raison pratique. (...) Si donc il y a antinomie entre le déterminisme des mouvements et la liberté des intentions ; (...) si le corps des actes est séparé de l'esprit qui les inspire, (...) et si (...) l'homme dépossédé de toute puissance métaphysique, exclu de l'être et comme écartelé, se sent entouré d'impénétrables réalités où peut régner l'illogisme le plus

absurde, alors la force de vivre est brisée avec l'audace de penser. Sous prétexte de rehausser et de fortifier peut-être la raison pratique, on l'a ruinée du même coup qui frappe à mort la raison pure. » (Blondel 1937).

Par ce long passage, Blondel souligne qu'en portant toute son attention sur l'expérimentation, la science oublie en un sens celle qui la produit, la raison, qui elle n'est pas dans l'expérience, mais la conçoit. Il attire l'attention sur le fait que la science est une production intellectuelle, donc humaine. De plus, il souligne l'extériorité de l'observateur dans l'observation. En somme, Blondel introduit l'idée que la science physique ne peut être vraiment comprise que par le biais d'un regard métaphysique qui pense la manière de produire des connaissances en relation à une intention, à la validation d'une hypothèse formulée dans une théorie scientifique d'une discipline, bref, en référence à un fondement. Ainsi, les limites de la philosophie critique et de la méthode scientifique étant identifiées, Blondel définit la manière de considérer la vie et propose les facultés humaines relatives à l'action pour synthèse :

« C'est une question de métaphysique, de morale et de science à la fois que le problème de la vie : l'action est cette synthèse du vouloir, du connaître et de l'être, ce lien du composé humain qu'on ne peut scinder sans détruire tout ce qu'on a désuni ; elle est le point précis où convergent le monde de la pensée, le monde moral, et le monde de la science ; et s'ils ne s'y unissent pas, c'en est fait de tout » (Blondel 1937).

Dans ce premier chapitre de la seconde partie, Blondel rappelle donc que le savoir est produit par l'activité scientifique qui déduit un ensemble de connaissances par un raisonnement théorique et une expérimentation relevant de techniques et d'instruments. Puis, Blondel renvoie le savoir de la science à son origine, humaine, et aux responsabilités inhérentes aux actions qu'elles soient individuelles ou collectives. En cela, la pensée de Blondel est éminemment actuelle. De plus, elle est véritablement synthétique, car elle redonne à la fois leur place à la pensée par la philosophie, à l'éthique, par la morale, et à la connaissance, par la science. Il les distingue dans leur production et les réunit par leurs producteurs, les humains, et les facultés inhérentes à notre espèce de vouloir, de connaître et être. Enfin, il propose que cette diversité inhérente à notre nature dialogue au lieu de s'exclure dans l'intérêt du collectif et afin d'être dans une démarche de construction.

Dans le second chapitre de la troisième partie de l'*Action*, Blondel s'attaque à « l'incohérence des sciences positives » (Blondel 1937), comme l'indique le titre. En préambule, il reconnaît que « c'est un fait qu'entre les sciences déductives et les sciences expérimentales il y a un

commerce fécond. » (Blondel 1937). Puis, il ajoute : « la science même ne semble avoir de raison d'être ni de puissance de progrès que par cet échange assidu ; c'est l'unité qui fait sa force et qui assure son empire. ». (Blondel 1937). Mais, aussitôt, il soulève le paradoxe que cela induit : « Mais de cette unité réelle et incontestée la science elle-même rend-elle compte ? » (Blondel 1937). La réponse est narrative. Ensuite, il exprime les présupposés des mathématiques qui « supposent que l'analyse du réel est achevée » (Blondel 1937), ce que l'expérience, par le fait même qu'une expérience soit réalisable, en attente d'être réalisée pour confirmer ou non une théorie, contredit. Cela est contredit aussi par l'impossibilité d'inclure la pensée au réel puisque le fait d'abstraire consiste au contraire à se mettre hors du fait et de le symboliser par un nombre ou un mot. Il poursuit donc : « comme, en fait, elle ne l'est ni ne peut l'être jamais, c'est en ce sens qu'elles ont un caractère idéal et transcendant par rapport à la connaissance empirique. » (Blondel 1937).

En outre, il montre les limites prouvées par l'expérience de l'idée d'unité :

« sans donc se perdre en une régression infinie, elles se fondent sur l'un, comme si l'expérience atteignait l'atome ou le point, sur l'homogène et le continu de l'espace, de la grandeur et du nombre, comme s'ils étaient la limite réalisable ou vérifiée de la discontinuité et de l'hétérogénéité sensibles. L'antinomie du simple et du multiple, de l'indivisibilité et de la divisibilité indéfinie y est supposée résolue ; c'est le principe même de tout calcul ; et par cet audacieux artifice de pensée que justifie le succès, l'on fait comme si l'on tenait ce qui échappera toujours à nos prises, l'unité et le continu homogène. » (Blondel 1937).

Ainsi, il affirme que l'unité et le continu homogène sont inconnaissables, contrairement à ce que l'interprétation philosophique de certaines théories scientifiques postulent. En effet, l'expérience finie ne peut atteindre le continuum de l'espace, il ne peut l'être qu'à travers une théorie mathématique, qui le présuppose. Ainsi, la théorie de la relativité générale qui, postule et formule un concept l'espace-temps continu réunissant tous les phénomènes physiques qui se déroulent dans l'espace au fil du temps, ne peut être expérimentée et utilisable, en fait, que dans certaines conditions. Il s'agit donc d'un précieux outil mathématique qui fait comme si le continu géométrique de l'espace-temps pouvait être divisé à l'infini et constitué d'une multiplicité de points. Mais, bien-entendu, jamais ces points ne sont atteints. De plus, du point de vue physique, la relativité générale montre ses limites dans les domaines où la mécanique quantique se montre efficace (mécanique quantique où le discret manifeste ses exigences face au continu relativiste). Et, la mécanique quantique n'explique pas tout n'ont plus, puisque la relativité générale est efficace là où la mécanique quantique ne l'est pas. En outre, nous avons

déjà évoqué des réflexions philosophiques à propos de la renormalisation. Nous comprenons donc bien l'enjeu d'une théorie unificatrice, et en même temps, ses limites. Cette théorie n'échappe pas à des idéalizations mathématiques efficaces mais qui postulent a priori le continu ou le discret en mettant a priori entre parenthèses les autonomies qui les renferment.

Par ailleurs, il est important de souligner que Blondel qualifie le continu, puisque le concept de continu est décrit dans la théorie des ensembles de Cantor. Et la caractérisation du continu (sa cardinalité) procède non pas d'une sorte de découverte, mais bien de certains choix axiomatiques, en partie arbitraires. Ainsi, nous comprenons qu'affirmer connaître le continu homogène serait insoutenable, puisqu'il nous est, de fait et comme tel, inaccessible à notre expérience finie. Les variétés de compositions des structures chimiques et biologiques font justement apparaître la nature hétérogène de bon nombre de systèmes composés qui sont étudiés par les sciences et qui résistent à une appréhension homogénéisante. Après avoir examiné les limites des mathématiques, sciences déductives, prouvables par les connaissances des autres sciences, Blondel exprime les limites des sciences de la nature.

« Les sciences de la nature, en décrivant les êtres ou en déterminant les faits tels qu'elles les observent ou les produisent, supposent toujours la réalité originale, la perfection relative, la suffisance de chaque synthèse en tant que synthèse. L'unité concrète y est considérée comme un total qui, bien que divisible, n'est pourtant pas résoluble en ses parties. » (Blondel 1937).

Ici, les sciences de la nature se fondent sur l'existence de totalités dont on suppose qu'elles pourraient être reconstituées à partir d'éléments, de parties. Cependant, cette reconstitution (de systèmes biologiques complexes à partir de particules élémentaires par exemple) n'est jamais effectivement réalisée. Les limites des mathématiques et de la physique décrites, il ajoute une réflexion sur la diversité des méthodes scientifiques utilisant soit le formalisme, soit la théorisation d'un processus naturel. Ce qui est en jeu ici c'est le fait que les sciences utilisent soit un continu ou des totalités, soit le discret ou des éléments, mais sans vraiment détenir la clef de l'articulation entre ces réalités postulées a priori :

« Tantôt elle cherche, en dehors des phénomènes immédiatement perçus, ce qui est généralité abstraite et enchaînement nécessaire ; oubli fait de la nature des composés et des qualités propres aux éléments, le calcul apparaît comme la forme continue de l'univers. Tantôt, oubli fait de l'unité de composition, elle s'applique à donner à l'intuition synthétique une précision quantitative et une individualité définie. » (Blondel 1937).

Puis, Blondel en vient à réfléchir sur la cause profonde qui permet l'analyse et la synthèse des connaissances par l'existence de la capacité inhérente à notre espèce de comprendre, raisonner, connaître, par la présence de facultés cognitives :

« Du simple et de l'homogène qu'elles supposent d'emblée au terme de l'analyse et qu'elles placent au principe de leurs constructions, les sciences exactes dérivent leurs synthèses a priori. Or d'où naît l'idée même de ce procédé synthétique qui leur est essentiel ; d'où sait-on considérer la construction comme un tout au sein duquel les matériaux ont des relations déterminées, un ordre, une valeur qu'ils n'avaient point avant d'en faire partie ? » (Blondel 1937).

En effet, par des procédés scientifiques, nous pouvons décrire, décoder, manipuler, modifier, déconstruire, fissurer des composés de matière jusqu'à une certaine échelle, mais tout autre chose est de reproduire ce que l'évolution de la matière et de la vie ont produit. On peut faire de la vie ou de la matière « artificielle », certes. Mais il faut reconnaître qu'il n'est pas évident de réduire et de comprendre les systèmes complexes et unifiés simplement par leurs composants, car les types de composés fonctionnent en correspondance avec un milieu spécifique. Nous pouvons aussi illustrer cela par le fait que l'humain peut produire une intelligence artificielle. Mais il en reste le programmeur, source de l'intelligence dont il est doté. Et, il se heurte à des difficultés s'il veut réduire toute l'intelligence à des mécanismes formels, car il existe bel et bien des limitations internes aux formalismes comme l'ont montré les travaux de Gödel, Turing, Church et, en philosophie, de Jean Ladrière et Thomas Nagel. Et ces limitations viennent entre autres du fait que l'on ne peut entièrement résorber dans le formel ce qui justement rend possible le formel.

Ensuite, Blondel présente les concepts fondamentaux des sciences, relatifs à la mesure, à la grandeur et au nombre, pour montrer l'inatteignable et ultime unité :

« Elles ne sont nées, ces sciences, que du moment où dans l'homogène et le continu, elles ont supposé une différenciation et des relations possibles de grandeur et de nombre ; c'est la matière idéale à laquelle elles vont imposer la forme de leurs déductions. (...) Les composés symbolisent avec les simples », comme le remarque Leibniz ; c'est-à-dire qu'à leur tour ils peuvent être considérés comme unités, mais comme unités complexes. » (Blondel 1937).

Enfin, il synthétise sa pensée sur les trois principales limites des sciences dites exactes. Ces arguments démontrent le réel « tronqué » qu'elles décrivent. Premièrement, il conclut à propos de la cognition et de l'efficacité des mathématiques :

« Elles ne rendent nullement compte ni de la façon dont elles se dégagent de la réalité, ni de la façon dont elles y reviennent et s'y ajustent. Ce qu'elles ont d'efficacité, elles ne l'expliquent pas ; ce qu'elles opèrent, elles ne le connaissent pas. » (Blondel 1937).

Donc, les sciences se montrent efficaces, mais la raison de l'efficacité scientifique n'est pas donnée dans les sciences.

Deuxièmement, il mentionne le fait que, paradoxalement, dans la réalité qu'elles tentent de décrire, elles n'intègrent pas toutes ses dimensions, en particulier la subjectivité des ressentis et le caractère nouveau et inédit des structures émergentes :

« Elles ne peuvent rendre compte de la plus simple sensation, ni du moindre acte. Dans la qualité, qui leur échappe en tant que qualité, dans la hiérarchie de chaque synthèse qui forme comme un monde nouveau, il y a un élément qui leur est absolument réfractaire, ce qui, par exemple, restera propre aux composés chimiques quand on aura réussi à traduire leurs combinaisons dans l'esprit et la langue de la physique mathématique, (...) » (Blondel 1937).

Troisièmement, à propos de l'évolution des connaissances, il ajoute :

« Dans leur travail d'intégration continue, elles font constamment appel à un procédé synthétique seul capable de leur fournir une matière qui soit pour ainsi dire toute formelle ; mais cette initiative même de la pensée leur échappe ; (...) » et, finalement, « le ressort de la science n'est pas de la science. » (Blondel 1937).

Retenons donc de Blondel la leçon suivante : ce qui rend possible et soutient en profondeur la constitution d'une théorie ultime échappe à la science !

Pour conclure, la raison essentielle pour laquelle nous avons cité Blondel est son rappel du fait que la science est avant tout une méthode rationnelle, et donc une production humaine qui cherche une articulation entre la pensée et le monde. Or, pour articuler la pensée sur l'univers et l'univers de la pensée, il faut passer par une diversité de disciplines, les sciences de la vie et de la Terre et les neurosciences cognitives et sociales. Cependant, nous avons évoqué aussi les

limites de ces disciplines pour décrire la vie et la pensée, qui sont plus qu'une somme de connaissances théoriques et relative à l'incommensurable vécu individuel et à la diversité des histoires de vie. Toutes les sciences sont mues par une action, produit d'une volonté dont la dynamique ne trouve pas sa justification dans et par ces sciences elles-mêmes.

Enfin, cette accumulation de connaissances par une diversité de domaines scientifiques (sciences exactes et SHS) et une réflexion philosophique, relative à une diversité de facultés, est un acte spécifiquement humain à ce si haut degré d'abstraction et de cognition passant par la conceptualisation :

« (...) d'où sait-on considérer le monde comme un tout où il y a des parties distinctes ; d'où naît l'idée de ce procédé analytique qui sous la primitive indétermination de la qualité introduit la clarté et la distinction numérique ? Nulle connaissance expérimentale n'est concevable sans une analyse fictive et sans une abstraction initiale qui délimite artificiellement la matière même de l'observation. » (Blondel 1937).

Ainsi, la critique Blondélienne du réductionnisme réside dans « l'incohérence des sciences positives et la médiation de l'Action ». (Blondel 1937). Cette critique résulte d'une analyse interne à la pratique scientifique qui lui permet d'en déduire que « la vraie propriété de toute science fondée sur l'expérience, c'est cela même que l'on ne déduira jamais, la nature complexe, la discontinuité et l'hétérogénéité des objets qu'elle prend comme matière de ses recherches. » (Blondel 1937). Les sciences pour décrire l'univers empirique ne peuvent le faire qu'en partant de « fictions théoriques » : le continu, le point, la totalité, l'élément... Mais ce recours nécessaire et efficace ne peut ultimement se justifier par et dans les sciences, car, pour Blondel, il trouve son fondement dans une action qui est la condition de la possibilité des sciences, mais qui ne peut être complètement comprise et justifié au sein de celles-ci. Dans la perspective blondélienne, une théorie ultime, unificatrice des connaissances, ne serait pas cohérente, car elle permettrait d'unifier tous les savoirs alors qu'elle ne pourrait pas savoir ce qui détermine la condition de possibilité de la science elle-même. L'action dont procède l'écriture de la TVU n'est pas décrite et comprise dans la TVU !

Enfin, si nous avons mentionné Blondel en raison de son apport argumentaire critique sur une théorie du tout, nous devons toutefois souligner que la notion d'action dépasse largement cet ouvrage et renvoie à un pan entier de la philosophie : la philosophie de l'action. Alors, nous

voulons mentionner en un court paragraphe une manière plus générale d'aborder la notion d'action en nous référant à l'ouvrage du même nom. 54

L'analyse de l'action intègre sa complexité, dans le sens où une action est la conséquence d'autres actions, conscientes ou inconscientes, volontaires ou non, et la raison de cette volonté : les raisons, motifs, pour lesquelles nous voulons, ou ne voulons pas, agir et agir d'une certaine manière. Mais, les motifs de l'action ne sont pas forcément raisonnables. En effet, je peux choisir d'agir de façon déraisonnable. L'analyse de l'action inclut donc aussi l'analyse des processus de décision, incluant eux-mêmes diverses formes de croyances. Or, les croyances sont fondées par ce qui nous semble crédible, justifiable, en mentionnant des arguments qui nous paraissent pertinents en fonction d'une situation. De plus, l'analyse conceptuelle, donc philosophique, de l'action sous-tend, en plus des fins, les moyens pour les atteindre, et les possibilités et probabilités de réalisation de ces fins par ces moyens. Afin d'intégrer la diversité de mécanismes que sous-tend l'action, il est possible de réfléchir à une inférence pratique, comme le fait von Wright, par la coordination d'actions et Kenny, qui examine les prémisses (désirs, besoins, devoirs) et les conséquences (plan d'action (stratégie) et réalisation (effet pouvant être différent de résultat escompté)).

Ensuite, cela demande aussi d'examiner plus en profondeur ce qui détermine la motivation. Du point de vue des mécanismes internes, internalisme, il est possible d'identifier trois moteurs à l'action: l'action impulsée par un sentiment d'appartenance à des valeurs, ou par une diversité de motifs nécessaires ou non, ou bien l'un et l'autre, une cohérence entre des valeurs et des motifs. Cela peut sembler abstrait, alors prenons un exemple simple : je mange pour vivre (motif) car vivre fait partie de mes valeurs (Je pense qu'il est bon que je vive). Ensuite, la manière de s'alimenter permettra d'identifier les moyens choisis pour cette fin selon d'autres motifs et valeurs. Par exemple, je mange ce que je produis dans mon jardin (alimentation saine) ou je mange chez des amis (partage). Puis, il s'agit de distinguer un désir de la rationalité. Je peux désirer quelque chose dont je n'ai pas besoin ou qui ne renvoie pas à mon référentiel de valeurs. Ce désir est alors une pulsion générée par l'attractivité d'un élément externe. Or, les processus psychiques de délibération du passage à l'action, ou non, à cause de ce désir est davantage descriptible par la psychologie que par la philosophie, car il nécessite l'intégration de plusieurs processus psychiques compris par cette discipline, comme le circuit de la récompense etc.

⁵⁴Bruno Gnassounou, « Philosophie de l'action : Action, Raison Et Délibération », Vrin, 2007.

Cependant, Hume a réfléchi sur ce qui impacte la volonté dans *Le traité de la nature humaine*, autour de la dialectique entre passion et raison. Alors, ce qui est associé à la raison est lié à une détermination de la morale car, comme l'écrit Hume, « la raison seule ne peut jamais produire une action ni susciter une volition, j'en infère que la même faculté est tout aussi impuissante à prévenir une volition ou à disputer la préférence à une passion ou une émotion ». Ainsi, raisonner, ce n'est ni vouloir, ni choisir. Il convient donc de ne pas confondre cette diversité de facultés et d'observer comment elles communiquent. Il faut déjà vouloir, puis raisonner, et enfin choisir. On peut alors choisir d'adopter un comportement rationnel, correspondant à une morale ou éthique, ou irrationnel en trouvant toutefois une justification. Par exemple, je ne veux pas tuer mais je peux tuer pour me défendre (légitime défense). Ainsi, la raison est déplacée du côté du droit et la nouvelle interrogation sur la construction de la loi. Autrement dit, sur une autre faculté : celle de juger (légiférer) et de gouverner (exécuter).

Finalement, il n'y a donc plus une opposition entre désir et raison, puisque « d'aucune façon on ne peut déclarer une passion déraisonnable ». Le processus de décision résulte donc de la détermination du préférable, mais le préférable en fonction de quoi ? Nos sociétés occidentales fonctionnent sur la primauté de la liberté et la responsabilité individuelles, mais alors, comment faire société face à la diversité d'opinions sans une autre valeur essentielle : la tolérance. Et, qu'en est-il en cas de folie ? Nous voyons les limites de ce système philosophico-politique quand il s'agit d'appliquer un modèle répressif paradoxal, privant de liberté, ou impuissant quand l'action est mue par la folie. Alors, deux autres domaines apparaissent nécessaires : l'éducation et le soin. Nous ne sommes donc pas étonnés de trouver un texte de Hobbes à la fin de cet ouvrage et une réflexion sur le fait que la connaissance pratique correspond « au fait de savoir ce que l'on fait », donc sur la notion de responsabilité. L'intention réapparaît alors comme moteur de l'action et élément déterminant de la responsabilité, ou non, de l'agent des conséquences de son action, quand l'effet est différent de l'attente, en tentant de comprendre la subjectivité. Pensons encore au fait de se défendre (attente), différent de l'intention de tuer (effet). Cela ouvre vers d'autres champs de la philosophie, la philosophie du soin, la philosophie du droit, la philosophie politique pour une analyse de l'action collective. Cela renvoie en particulier aux travaux de Hannah Arendt pour l'action collective ⁵⁵et pour l'action

⁵⁵ A ce propos, nous renvoyons vers la synthèse de Michelle Duval intitulée *L'action collective pensée par Hannah Arendt : comprendre l'agir ensemble pour le favoriser*, 2008, en ligne : <https://id.erudit.org/iderudit/018345ar>

individuelle au lien entre Les neurosciences et la philosophie de l'action.⁵⁶ Fondamentalement, on distingue une action consciente, donc responsable, et inconsciente, automatique. Si les modes d'auto-organisation sont bien étudiés par les sciences, la notion de responsabilité resterait à approfondir par la philosophie.

4. Le matérialisme, le concret comme fondement, et les ordres de réalité.

Blondel considère la condition de possibilité de la science, son ressort, l'action, comme transcendant la science, Mais on pourrait envisager de rester dans l'immanence. On pourrait supposer que la constitution d'une pensée totalisante, englobant toutes les représentations scientifiques, ne pourrait ultimement se fonder sur les seules sciences, mais plutôt sur une philosophie, matérialiste, par exemple. En effet, la philosophie matérialiste permet de décrire cette réalité plurielle de la diversité des processus naturels évoqués dans plusieurs disciplines scientifiques. Les ouvrages parus aux Éditions matériologiques, par exemple, sont riches de réflexions sur le sujet et sur l'évolution de la philosophie matérialiste relative à celle des connaissances scientifiques.

A la moitié du vingtième siècle, la philosophie matérialiste des sciences s'incarne notamment dans la pensée de Mario Bunge et dans les travaux publiés par Marc Silberstein, plus précisément dans la synthèse intitulée : « matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain ». (Silberstein 2018). La pensée philosophique est alors un lieu de communication entre les sciences pour avancer dans la connaissance rationnelle.

En introduction de cet ouvrage, Silberstein rappelle « l'unité plurielle du matérialisme », qui recourt au raisonnement et à l'accumulation d'une diversité des connaissances scientifiques. Puis, il cite Michel Paty, qui précise la distinction entre science et philosophie matérialiste : « Le matérialisme n'est pas une science : c'est une position avant tout philosophique, et aussi métaphysique, ouverte sur les apports des sciences, sur la science dans sa diversité et dans son unité, et qui permet de concevoir le monde dans son immanence ». (Silberstein 2013). Le matérialisme contemporain s'oppose donc à l'idée de transcendance, dans le sens où elle recourt

⁵⁶ Jean-Luc Petit, « Les neurosciences et la philosophie de l'action Problèmes & Controverses », Vrin, 1997.

à ce que l'on peut penser et observer et non à des postulats invérifiables. Le matérialisme est donc réaliste⁵⁷

Toutefois, toute la réalité n'est pas descriptible et prévisible puisqu'il y a notamment des évolutions de fonctions impréconcevables, comme nous l'avons vu avec la pensée de Kauffman. De plus, la réalité humaine évolue aussi en fonction des capacités de créations et d'innovation humaines. Le devenir ne peut donc qu'être imaginé. En effet, l'imagination émerge de l'activation de l'aire cérébrale préfrontale, les représentations mentales qu'elle génère résultent des interactions entre extériorité et intériorité et permettent de modifier le réel. Comme l'écrit Cédric Faure, en s'inspirant du psychologue et psychanalyste Didier Anzieu : « Le « langage de l'imaginaire » se déploie ainsi continûment, dialectiquement, dans l'interaction intérieur/extérieur, dedans/dehors, sujet/objet, en des « processus d'intériorisation de l'extériorité » et des « processus d'extériorisation de l'intériorité ». (Faure 2015).

La création artistique ou technologique montre ce passage du réel à sa modification. Nous pensons en particulier à la créativité de Léonard de Vinci. La créativité engendre une émancipation des automatismes naturels. Elle peut permettre d'améliorer les conditions de vie. Elle peut donc avoir une finalité positive pour l'humanité, mais elle peut parfois aboutir à des conséquences imprévisibles. Ainsi, la connaissance de l'atome a pu conduire jusqu'à la bombe thermonucléaire. De même, nous ne savons pas, aujourd'hui, jusqu'où l'intelligence artificielle nous conduira, et quel l'usage en sera fait. Or, cet usage est déterminé par la volonté collective.

Cette imprévisibilité nous ramène à l'idée de Kauffman et, plus précisément, à son idée originale de l'« impréconcevable ». Ce que montre Kauffman, c'est une impossibilité de prédiction (qui est liée à nos limites ; impossibilité épistémologique). Par exemple, nous n'aurions pas pu concevoir toute la variété de conformation des protéines, avant de les découvrir. De même, nous ne pouvons pas imaginer toutes les combinaisons possibles du vivant. Il s'agit donc bien d'une impossibilité épistémologique et non d'une impossibilité ontologique. Ce n'est pas une indétermination ontologique (qui serait dans l'être même des systèmes). Celle-ci est d'ailleurs impossible à établir: l'indéterminisme en mécanique quantique peut s'interpréter soit par un indéterminisme fondamental (c'est le cas de l'interprétation de Copenhague), soit par une impossibilité de prédire dans quel branche d'univers on ira après une mesure (alors que toutes les branches d'univers sont possibles; c'est l'interprétation des univers multiples d'Everett), soit par une limite de la connaissance, le monde quantique étant quant à

⁵⁷ Sur l'histoire du matérialisme, nous renvoyons à P. Charbonnat, « Histoire des philosophies matérialistes », Syllepse, 2007.

lui totalement déterminé, mais cependant non-local (c'est l'interprétation déterministe de Böhm).

La position de Kauffman est compatible avec une position où tout serait déterminé physiquement, mais où nous ne pourrions pas prédire le devenir du système complexe parce que justement il y a trop d'état possibles et trop d'évolutions déterminées par des fluctuations imprédictibles. Maintenant, il ne faut pas confondre : une indétermination physique (ontologique ou épistémologique) et une contingence métaphysique. La première relève du phénomène, la seconde du noumène, si on veut prendre le vocabulaire de Kant.

La notion de noumène est introduite par Kant pour désigner la "chose en soi" (Ding an sich), c'est-à-dire la réalité en tant qu'elle est indépendamment du sujet connaissant. Bien entendu, Kant dit que le sujet connaissant ne peut jamais connaître la réalité "en soi", il ne peut la connaître que par le biais du phénomène, c'est-à-dire de la réalité en tant qu'elle apparaît au sujet au travers d'une constitution (réalisée par les "formes a priori de la sensibilité"). Bref, nous ne connaissons jamais le noumène, mais seulement le phénomène. Du noumène nous ne pouvons que penser (pensée = "Nous" en grec, d'où le nom "noumène") qu'il existe, mais c'est la seule chose que l'on peut dire, car jamais le réel en-soi, le noumène ne sera connu comme tel.

Par ailleurs, la critique du réductionnisme peut se concevoir à deux points de vue :

1) *une impossibilité physique* de faire la réduction de tous les niveaux à un seul en raison de l'imprédictibilité. Il s'agit de ce que nous avons vu avec les notions d'émergence, de renormalisation, de théorème central-limite, etc.

2) *une impossibilité métaphysique* de faire la réduction de tous les niveaux à un seul, car il existe une sorte de profondeur métaphysique du réel qui transcende le phénomène sans le nier. Ce sont ces divers ordres de la nature, ces processus naturels, compréhensibles par l'intelligence humaine et traduisible en langage mathématique, ces divers ordres desquels émergent une diversité d'effets.

Kauffman se base sur la première, l'impréconcevabilité liée à une limite physique qui n'est pas liée à l'existence d'une sorte de niveau qui transcenderait la nature : il s'agit d'une sorte de richesse irréductible dans la nature. Elle peut être traitée par une comparaison des philosophies des disciplines scientifiques, leurs similitudes et leur divergence, comme nous l'avons fait dans ce travail.

Toutefois, la seconde question demeure, et celle-ci relève de la philosophie pure : peut-on s'en tenir seulement à 1) pour penser la vie, la pensée, l'Humanité, l'art, l'éthique... ? Nous avons aussi tenté de répondre à cette question en montrant que les lois de la physique ne traduisent par toutes les régularités dans la nature avec la notion de système complexe. A présent, nous allons voir qu'il en est même qui ne relèvent pas de la nature, mais de l'action humaine sur la nature par l'innovation technique et technologique. Ainsi, il peut y avoir une impossibilité liée à l'indéterminisme quantique, mais même au niveau classique, dans un système "non-ergodique" (un système qui ne finit pas par se stabiliser ou par repasser toujours par le même état), il n'est pas possible de prédire l'évolution du système dans un temps raisonnable.

En outre, même si la mécanique quantique se situe à un niveau qui soutient les autres niveaux émergents, au niveau biologique, les phénomènes quantiques, petit à petit, disparaissent et le monde classique émerge. On n'a plus les traits du quantique. On peut donc décrire une diversité de niveaux de réalité.

Certes, il existe une biologie quantique. Par exemple, un seul photon peut influencer des photorécepteurs et provoquer une réaction biologique. Mais, bien entendu, la mécanique quantique s'applique à des phénomènes en gros microphysiques (des domaines pour lesquels : $E.t$ ou $x.p$ sont proches de $h/2\pi$; E =énergie, t =temps, x =espace, p =quantité de mouvement). Donc au niveau des organismes tout entiers, les comportements ne sont pas quantiques et tout ce qui est chimique en biologie est liée à la chimie quantique. Mais, nous avons vu que la réalité biologique fonctionne à partir de composés et de processus propres ayant leurs propres contraintes. Il y a donc une réalité descriptible à plusieurs niveaux, aux échelles microscopique, macroscopique et cosmologique, et divers ordres de réalité, une réalité naturelle et une réalité liée à l'activité humaine, qui passe par l'acquisition de savoirs formels, conceptuels, et de savoir-faire, techniques, en somme, une réalité artificielle, composée d'artefacts.

Conclusion du chapitre 1.

La quête de réalité limitée par l'imprévisible.

Comme nous l'avons vu, la justification des connaissances scientifiques relève de plusieurs critères possibles d'objectivité et, grâce à ce chapitre, nous avons montré la diversité possible de choix de fondements en fonction d'une diversité de philosophies : idéalisme, essentialisme, pragmatisme, matérialisme, donc réalisme. Nous avons mis en lumière l'influence platonicienne de l'idéalisation et l'influence Leibnizienne de l'élémentarité dans la philosophie des sciences contemporaines. Nous avons aussi souligné les limites de ces philosophies. La première se heurte à la question de la localité du monde des idées et la seconde à la nature des essences, comme les monades. Nous avons aussi mentionné les limites de la science mentionnées par Blondel et l'apport du matérialisme contemporain par le fait qu'il intègre une diversité de connaissances scientifiques. Cependant, nous avons rappelé qu'il y a aussi de l'impréconcevable et une possible description de plusieurs ordres de réalité : la réalité naturelle et la réalité humaine constituée d'artefacts, donc une réalité artificielle ou « artéfactuelle ».

Or, le monde des concepts est dans la réalité humaine, dotée d'un langage élaboré et de facultés cognitives variées. L'imagination et le haut degré d'abstraction que nous possédons permet de comprendre des fonctionnements du réel, et même de le modifier en fonction de nos volontés grâce à la possibilité de réaliser des actions collectives. La collaboration internationale et interculturelle a conduit l'humain à aller au-delà de son berceau, la Terre. Bien entendu, la curiosité motive cette recherche et un dépassement de soi. Mais vouloir savoir pour savoir, vouloir comprendre, révèle une quête de vérité.

Cependant, elle pose une question philosophique : peut-on tout faire pour savoir ? L'action n'est pas sans conséquences et toutes les conséquences ne sont pas anticipables. Elles ne le sont pas pour deux raisons : d'une part à cause de l'imprévisibilité, évoquée en conclusion du second chapitre de la seconde partie, et d'autre part à cause de l'impréconcevable évoquée dans la fin de ce chapitre. L'imprévisible est relatif au fait que l'on ne peut pas imaginer tous les possibles, car ils n'existent pas encore pour nous, d'une part parce que tout n'est pas déterminé, et d'autre part, parce que tout n'est pas connu. Par exemple, si un fœtus avait toutes les facultés cognitives développées et que l'on puisse l'interroger sur ce qu'il pense qu'il va lui arriver, il serait incapable d'imaginer le monde dans lequel il va apparaître.

Nous sommes donc réduits à connaître ce qui correspond à notre milieu de vie et à connaître selon notre nature (nos facultés sensibles et cognitives). En revanche, nous avons la possibilité de modifier notre milieu de vie. Toutefois, la réalité humaine actuelle ne pouvait pas être imaginée, prédite, par les plus grands génies passés, en particulier, la révolution numérique. Or, cela est nommé progrès. Toutefois, en est-ce vraiment un, et pour qui ? Cette question ouvre sur le second chapitre au sein duquel nous donnerons quelques éléments de réponse concernant la finalité des sciences.

CHAPITRE 2.

Les finalités des sciences

Introduction du chapitre 2.

Les finalités du progrès et de l'innovation.

L'objectif de ce second chapitre est de montrer l'apport d'une réflexion philosophique sur la finalité des sciences en fonction de l'usage qu'il est fait des connaissances puisque, comme nous l'avons rappelé avec Blondel, la science est l'une des activités humaines. La science s'inscrit donc dans la réalité humaine, qui comportent des actions individuelles et des actions collectives. Il faut donc analyser le sens de ces actions et la raison d'être de ces collectifs.

Or, ce qui les animent, ce sont des référentiels de valeurs parfois divergents en fonction de la hiérarchisation de ces valeurs. Tout d'abord, il s'agit d'observer les conséquences des sciences et son lien avec les techniques quand la finalité est pratique : aboutir à une application. Cette orientation utilitariste conduit à la notion de progrès. Il s'agit ensuite d'interroger la finalité du progrès. Alors, des volontés humaines se révèlent, parfois communes, et parfois divergentes, en fonction du référentiel de valeurs.

Dans le chapitre précédant, nous avons vu qu'il était possible à partir des connaissances scientifiques d'adopter un point de vue philosophique soit idéaliste, soit réaliste. C'est le point de vue réaliste, matérialiste, que nous avons privilégié en décrivant les substrats nécessaires au vivant et à la pensée. Cependant, plusieurs ordres de réalité émergent : la réalité naturelle et la réalité humaine, celle construite par l'humain avec un mode de vie sophistiqué. A présent, nous allons donc nous intéresser à l'activité humaine induite par l'acquisition de connaissances. Cela conduit à traiter la question des usages qui sont fait du savoir. Cela amène également à observer qu'une description scientifique est insuffisante, car la réflexion sur son usage requiert de sortir

d'elle-même pour s'interroger notamment sur la place de la science dans la société. Ce sujet relève d'une discipline, la sociologie des sciences. Cependant, il est possible de l'aborder d'un point de vue plus philosophique à travers le concept de progrès : de quel progrès parle-t-on ?

Le progrès est systémique. Il sous-tend le progrès des connaissances et des techniques en fonction de l'activité des sociétés. Il engendre de nouveaux modes de vie, parfois un progrès social quand un progrès est partagé par le plus grand nombre, ce qui est le cas en particulier dans le domaine médical et, comme nous l'avons vu lors de l'épidémie de la Covid 19 par la vaccination à l'échelle mondiale. De plus, le progrès semble caractériser l'action humaine collective, puisque l'humain a toujours cherché à améliorer ses conditions de vie depuis la découverte du feu à la « fée électricité ». Progresser est donc un terme positif, qui évoque un cheminement.

Cependant, il pose question sur cette flèche du progrès, sa direction. Progresser jusqu'où et pourquoi ? Ainsi, nous présenterons dans ce chapitre deux points de vue. Le premier est celui du sociologue Jacques Ellul, qui fait entrer la notion de technique en corolaire de celle de progrès. Le second est celui du philosophe Gilbert Hottois, qui met l'accent sur un problème de la philosophie des sciences, puisqu'en effet, cette branche de la philosophie s'est trop souvent focalisée sur le langage au détriment d'une réflexion sur les techniques. A partir de ces réflexions stimulantes, nous abordons les notions connexes de technologie et d'ingénierie, ouvrant sur la philosophie des ingénieries, induisant celle des référentiels de valeurs. Nous verrons que l'association de tous ces possibles liés aux facultés humaines engendre une réalité autre que la réalité naturelle, une réalité innovante.

L'innovation correspond au fait de produire de la nouveauté, et la réalité humaine en recèle. Par exemple, il est possible de voyager à travers le monde et l'espace grâce à des moyens de transports rapides et adaptés. Il est possible de réaliser des vidéos et de les envoyer à l'autre bout du monde en un instant. Il est possible de voir des personnes à des milliers de kilomètres de distance en direct par des applications ou des réseaux sociaux. La réalité humaine utilise donc la réalité naturelle et la modifie pour produire des nouveautés qui engendrent de nouvelles pratiques. Ces nouvelles pratiques permettent aussi de modifier l'humain lui-même, par exemple, par l'ajout de prothèses ou d'exosquelettes permettant à des personnes en situation de handicap moteur de se déplacer à nouveau. Le progrès des connaissances engendre donc des progrès techniques qui génèrent des progrès sociaux.

Mais ce glorieux tableau est entaché par les catastrophes écologiques. En effet, l'humain a pensé à son mieux-être sans toujours considérer le respect des autres vivants et de la planète. Nous sommes donc aujourd'hui à un tournant où le progrès doit être inclusif du respect environnemental. De plus, le progrès ne s'est pas toujours fait sans préjudice pour certains. Pensons en particulier aux expérimentations sur les animaux. Pensons aussi au trafic d'organes et au trafic de ventres. Enfin, le progrès ne bénéficie donc pas forcément à tous et il peut même être source de division, quand il sert des fins militaires. Cela nous amène à nous demander si nous sommes vraiment aux commandes de la société technicienne que nous construisons et sur ce qui anime cette quête de progrès.

En rejoignant encore la pensée de Kauffman, nous pouvons affirmer qu'il y a une part d'imprévisibilité de l'évolution des usages liés aux progrès des technologies et de l'innovation. Par exemple, avec l'augmentation de l'utilisation des réseaux sociaux apparaît le phénomène des « fake news », fausses nouvelles. Cependant, les tendances des progrès techniques et de l'innovation sont aussi des marqueurs des valeurs des sociétés humaines. Or, nous voyons qu'au niveau sociétal, la liberté individuelle semble devenue prédominante, et le libéralisme économique aussi, si bien que la science est parfois utilisée afin de donner des résultats qui correspondent à ce que des industriels, par exemple, cherchent à vendre. La science devient alors l'inverse de ce qu'elle est : elle produit l'ignorance en distillant trop de doutes. Pour étudier ces phénomènes culturels, un nouveau domaine émerge, l'agnotologie. Ainsi, il existe une diversité de valeurs. Il nous faudra donc aboutir sur une ouverture axiologique, sur la science des valeurs.

1. La liberté d'action : le moteur du progrès.

La progression des techniques permet d'augmenter la quantité de connaissances. De nouvelles méthodes, relatives à la création de nouveaux instruments, font émerger de nouvelles branches au sein des disciplines. Pensons, par exemple, au génie génétique en biologie. Les progrès techniques permettent aussi de produire plus et de répondre ainsi à la demande croissante, en particulier la demande alimentaire, face à l'augmentation considérable de la population humaine. Cette augmentation de la population est aussi en lien avec l'augmentation des connaissances médicales, et la production de médicaments et de vaccins permettent de soigner et de survivre à des maladies qui conduisaient auparavant à la mort, et d'augmenter ainsi l'espérance de vie. La place des techniques est donc considérable dans l'acquisition des connaissances et elles se montrent aussi comme un progrès social. Cependant, la technique, comme la connaissance, sont des Janus, qui selon leur usage conduise au meilleur, soigner,

comme au pire, tuer. Alors, faut-il faire tout ce que l'on sait faire et de toutes les manières que l'on peut ? Ce n'est pas la question que pose la science, mais la question qu'elle induit. Pour l'évoquer, nous allons évoquer la réflexion du sociologue Jacques Ellul sur le système technicien et son lien à la science.

D'une part, la technique se distingue de la technologie. La technologie est initialement la science qui étudie les techniques, ses outils et machines. Elle est donc la connaissance des techniques, qui elles, sont dans l'environnement humain des champs aux buildings, par la robotisation de l'agriculture aux applications utilisées par les entreprises du CAC 40. La technique est le moyen concret dont on se sert. La technologie est la connaissance de ces méthodes. D'autre part, la technique est médiation. Mais, ces médiations « se sont tellement généralisées, étendues, multipliées qu'elles ont fini par constituer un nouvel univers ». (Ellul 1977). La technique se manifeste dans la production de nouveaux outils et machines, et « Le monde dans lequel vit l'homme est celui de son environnement mécanique. » (Ellul 1977). Le fonctionnement de la technique nécessite des consignes d'utilisation, des méthodes, et « la technique, est nécessairement simplificatrice, réductrice, opérationnelle, instrumentale et réordonnatrice. » (Ellul 1977). Peu à peu, la technique devient un nouvel ordre qui remplace « la totalité de ce qui a formé l'écosystème naturel. » (Ellul 1977).

Cependant, ce nouvel ordre pose de nouveaux problèmes :

« (...) quand il ne nous sera plus possible d'avoir de l'eau potable fournie par la nature, notre approvisionnement en eau dépendra d'usines d'épuration ou de dessalement de l'eau de mer : dans ces conditions, s'il y a manque d'eau ce ne sera plus une affaire de sécheresse climatique mais de détraquement d'une usine. On peut généraliser cet exemple. Le Milieu technicien fait que les problèmes et difficultés sont de l'ordre technique (...) » (Ellul 1977).

En effet, la dématérialisation génère un recours plus abondant à l'informatique et donc à une utilisation croissante de l'électricité qui nécessite une augmentation de la production d'énergie par les centrales nucléaires, alors que la question de retraitement des déchets nucléaires fait encore débat. Un autre exemple des conséquences néfastes du progrès des techniques sont l'apparition d'inondations à Dubaï suite à la production d'une pluie artificielle.⁵⁸ Par ailleurs, la technique pensée en système est « un ensemble de parties ou de sous-systèmes qui

⁵⁸ « Géoingénierie : Dubaï utilise des drones pour faire tomber une pluie artificielle et provoque des inondations », sur *notre-planète.info*, s. d. (en ligne : <https://www.notre-planete.info/actualites/4846-drones-pluie-artificielle-Dubai-geoingenierie>)

interagissent », ces parties sont les « structures » et les « Les inter-relations produisent une évolution » (Ellul 1977). Ainsi, Ellul mentionne trois caractéristiques du système technicien « ce système est lui-même composé de sous-système ». Il est souple et « élabore lui-même ses propres processus d'adaptation, de compensation, de facilitation ». (Ellul 1977).

Mais, « La technique a pris maintenant une telle spécificité, qu'il est devenu nécessaire de la considérer en elle-même, et en tant que système » (Ellul 1977). La technicité générale est « l'ensemble, l'interconnexion (des techniques) qui fait cet univers polytechnique, à la fois naturel et humain... », selon le philosophe Gilbert Simondon, cité par Ellul. (Ellul 1977). De plus, il est possible de dire aujourd'hui que la technique, globalement, recourt à l'outil informatique, et donc requiert une production d'énergie toujours plus importante et fait appel à un nouveau type d'ingénierie.

Ellul situe l'émergence de la technique en Occident au XVIIIème siècle et évoque le lien entre science et technique en rapport aux travaux du philosophe Krzysztof Pomian qui affirme « la fin de l'innocence scientifique » en expliquant que « Toute science est impliquée dans les conséquences techniques. » De plus, ce lien n'est pas causé nécessairement par une « implication politique » mais par sa pratique. Ainsi, Pomian démontre que « ce n'est pas la décision de politiciens d'user de telle ou telle façon d'une découverte scientifique qui est l'élément essentiel ». Cette analyse est intéressante, car elle redonne la responsabilité de leur action aux scientifiques. Toutefois, il existe une part d'imprévisibilité des conséquences de leur action. Ensuite, Ellul mentionne l'autonomie du chercheur qui se veut libre d'agir :

« (...) il paraît évident que le chercheur n'a absolument pas à se poser le problème du bien ou du mal, du permis ou du défendu de sa recherche. Celle-ci est, tout simplement. Mais il en est exactement de même pour l'application : ce qui a été trouvé s'applique, tout simplement. Le technicien applique sa technique avec la même indépendance que le chercheur. » (Ellul 1977).

Ainsi, la technique se distingue de préoccupation éthique et « se trouve dorénavant libérée de ce qui a fait l'entrave principale à l'action de l'homme : les croyances (sacrées, spirituelles, religieuses) et la morale. » Cette analyse est un point de vue car il existe une éthique de la recherche et les programmes de recherche ont une finalité, un but. La recherche part d'une question (problème) pour apporter une réponse (solution). La recherche possède donc un cadre.

Cependant, ce qui est intéressant, ici, c'est que le haut degré de liberté de recherche de la science est justifié par sa légitimité et sa légitimité par son efficacité. Alors, la science et la technique

s'émancipent des limites et font souvent tout ce qui est faisable pour découvrir l'inconnu. De plus, cette pratique s'universalise et peut générer une « passion technicisante » et « une idéologie du progrès » (Ellul 1977). En effet, cette idéologie du progrès est lisible en particulier dans l'ouvrage *Le commencement de l'infini* (Deutsch 2016). Dans ce livre, des connaissances scientifiques sont exprimées et la valeur explicative de la théorie mise en lumière. David Deutsch, par la comparaison de modèles explicatifs, montre la qualité rationnelle de l'explication fournie par des sciences. (Deutsch 2016).

Par ailleurs, un tel plaidoyer pour la science peut parfois la desservir par une possible fermeture aux autres manières de penser qui ne privilégient pas la rationalité ou qui ne conçoivent pas philosophiquement une échelle des êtres qui place l'humain à sa cime, puisque, finalement, l'ouvrage révèle une idéologie technoscientiste, qui repose sur la croyance que « les personnes sont les entités les plus importantes dans l'ordre cosmique des choses » (Deutsch 2016). (parce que les humains produisent des connaissances). Alors, si en effet, les explications scientifiques sont les meilleures explications rationnelles pour comprendre le monde, affirmer la supériorité de notre espèce parce que nous comprenons rationnellement le monde est un point de vue philosophique et non une connaissance scientifique. En outre, le choix de laisser la marche libre au progrès des techniques est un pari dont on ne maîtrise pas l'issue, surtout que, par la technique, la science se lie au marché de l'offre et de la demande dans la production de ses applications. Par exemple, Cléa Sambu explique dans un article les effets de la marchandisation des greffes d'organes. (Sambuc 2012). Un autre article explique le marché « des ventres », des mères porteuses. (Federici 2016). Vendre un rein ou son ventre pour survivre est-il un progrès pour l'humain ? Non. Il semble au contraire que cette pratique s'apparente davantage une nouvelle forme d'esclavage. Elle augmente donc les pouvoirs de certains et diminuent les droits des autres, des plus pauvres.

Ainsi, si « la technique est nécessairement progressive », elle n'est pas nécessairement un progrès social, un progrès pour tous, un progrès pour l'humanité, un progrès pour tous les vivants. Certes, le progrès est produit par les scientifiques, mais le progrès de la technoscience doit être mis au regard de ses utilisations économiques et politiques afin d'en avoir une vision globale. Le problème n'est donc pas tant la responsabilité des chercheurs mais davantage la marchandisation de certaines pratiques qui impliquent une activité scientifique. Cela renvoie donc aux sphères du modèle politico-économique d'une société humaine mondialisée et à l'articulation entre le droit national et le droit international.

Enfin, la technique « ne peut pas s'arrêter d'avancer. » Ne pas pouvoir maîtriser sa progression est le signe de notre subordination à elle, et non de notre domination. Elle nous est devenue si indispensable qu'elle a pris les rênes de notre histoire et peut-être même du cours de l'évolution de notre espèce. Il s'avère donc au moins nécessaire de comprendre son développement et sa finalité. Pour Schon, cité par Ellul, la croissance technique procède en trois étapes : « invention, innovation, diffusion ». Mais, l'évolution par la technique mène à l'indétermination de ses résultats en absence de finalité. Une tautologie ferait dire que la finalité du progrès est de progresser, mais sans indiquer dans quelle direction et dans quel but ou objectif. Cela soulève la question de « la place de l'homme par rapport à la technique. » (Ellul 1977).

Est-ce la technique qui sert l'humain ou l'humain qui sert la technique ? Cela soulève aussi la question de ce que nous voulons être, nous, l'humanité, en fonction du degré de liberté d'action que nous possédons et selon la manière dont nous l'utilisons. Par quel référentiel de valeurs voulons-nous nous qualifier en fonction de nos actions ? Bien-sûr, il n'y a pas de regret à bénéficier de l'eau courante, d'une douche individuelle et du chauffage ou de la climatisation. Le progrès peut être aussi associé au confort et au mieux-être, mais est-ce une finalité ultime ? Il ne faut donc pas percevoir le progrès comme un engrenage dont l'issue inconnue nous conduirait vers un avenir forcément hostile. Le progrès est aussi associable à bien des bénéfices et à des améliorations diverses. Ainsi, le progrès est relatif aux usages en fonction de volontés et la volonté est le plus souvent animée par une grille de valeurs transmise lors de l'éducation.

Nous sommes apparemment loin de l'objet de notre thèse, mais en réalité, nous restons au cœur de son sujet. La pensée d'une unification des connaissances ne peut faire l'impasse sur une réflexion relative aux liens qui se tissent entre sciences et technologies au sein des technosciences. Mais cette réflexion elle-même met en évidence les déterminants sociaux et politiques qui motivent les technosciences. Comprendre le système technoscientifique, son unité, demande donc de sortir du champ épistémique, montrant une fois de plus que cette unité des technosciences ne peut se comprendre en restant confiné au sein des technosciences, leurs ressorts étant en partie dans les intentions, les choix et les idéologies des groupes sociaux.

2. Des savoir-faire aux usages : techniques, technologies et responsabilités.

A présent, nous allons aborder la place des instruments dans les techniques, le rôle des technologies dans la société, le lien des savoir-faire avec les industries et les types de responsabilité scientifique. La description de la société technicienne d'Ellul est intéressante, car elle nous amènera à questionner les grilles de valeurs sous-jacentes aux usages des techniques et véhiculées par un modèle de société. Cependant, centrer la société autour des techniques exclut le fait qu'il y a bien d'autres composantes, comme les cultures, les droits, les devoirs et les savoirs, des institutions qui pensent les règles, les normes, les obligations et les contraintes. Cela nous tourne donc vers la réflexion plus nuancée de Gilbert Hottois qui analyse, d'une part, l'implication épistémo-ontologique de la « technoscience » et, d'autre part, les types de responsabilité de la science.

D'une part, ce philosophe aborde le lien entre philosophie des sciences et philosophie des techniques à travers son néologisme de « technoscience ». Nous mentionnons sa pensée, car il souligne un lien épistémo-ontologique qu'il caractérise par les manières de produire les connaissances en fonction des techniques expérimentales et les objets sur lesquels sont effectuées ces investigations. La dissociation courante entre science et technique peut être comparée à celle entre travail manuel et intellectuel, alors qu'on ne monte pas un mur qu'avec ses mains ! Cette dissociation se retrouve dans le système éducatif (filaire technique ou générale) et dans la divergence de position philosophique spiritualiste/idéaliste, négligeant le concret et privilégiant le langage, ou matérialiste/réaliste, position que nous défendons et qui inclut les techniques. Les techniques possèdent une place importante puisqu'elles permettent de produire des instruments qui prolongent nos sens.

L'instrument est étymologiquement l'organe et le mot technique renvoie étymologiquement à la production. Ainsi, la technique est la connaissance du procédé, d'un organe, pouvant être réduit à sa fonction, en rapport à son utilité. Dans ce sens, les instruments correspondent à de nouveaux outils. L'outil est étymologiquement l'objet utile. L'instrument est alors l'élément ontologique qui caractérise une technique, ayant une utilité, pratique, comme un instrument de musique sert à jouer...de la musique. L'association entre science et technique renvoie donc à des savoir-faire. Or, les savoir-faire d'une société sont classables par ses types de technologies. La technologie dite « clé » est celle qui est estimée essentielle. Elle est en rapport avec la survie

(la santé, l'environnement). Par exemple, la technologie agroalimentaire a pour objet les formes de nourriture et associe d'autres types de savoirs. La technologie de l'information et de la communication est spécialisée dans l'enregistrement et la transmission des informations. Les technologies intellectuelles ont pour objet la raison. Elles sont distinguables en trois axes : graphique, classificatrice et simulatrice (Robert 2000). Ces axes renvoient à des facultés cognitives différentes. Enfin, les nanotechnologies et l'aérospatiale, par exemple, se retrouvent au cœur des technologies de pointe. Sans nommer tous les types de technologie, nous comprenons donc qu'elles sont associées à des secteurs industriels, dont les financements sont publics ou privés. Nous arrivons donc clairement au lien entre les savoir-faire et les autres acteurs en lien avec ces savoir-faire, en particulier les industries.

D'autre part, indépendamment des applications, des techniques et des types de technologies, Gilbert Hottois caractérise quatre responsabilités qui échoient à la connaissance scientifique objective et universelle : la survie, la mémoire, la générosité, la fructification. La mention de ces critères implique des précisions, qu'il apporte, et le lien entre ces notions. La survie est celle de « la conscience et de l'esprit ». Cela n'implique donc pas en priorité la survie du végétal, par exemple. Toutefois, il s'agit, malgré cette préférence, de préserver aussi, « (...) les variétés naturelles, culturelles et techniques traditionnelles (...) », autrement dit, toutes les manifestations de la diversité. Pour cela, il suggère comme seconde responsabilité un devoir de « mémoire », afin de manifester « une forme de solidarité, diachronique et synchronique » mais aussi une « continuité » dans l'histoire humaine. (Hottois 2004).

Ensuite, Hottois souligne que le développement civilisationnel de la technoscience ne vaut que s'il est justifié. Or, il n'est justifié que s'il correspond à produire des améliorations de l'état naturel et si ces améliorations sont partagées par le plus grand nombre. C'est ici qu'intervient la « générosité » de la technoscience aussi associée à « l'allègement des souffrances ». (Hottois 2004). Il émerge dès lors entre ces lignes un possible ressaisissement de la technoscience en fonction de la volonté humaine qui la conçoit et la produit. Alors, finalement, cette volonté humaine collective dirigerait la technoscience en fonction d'une finalité relative au choix d'une valeur.

Enfin, Hottois justifie le choix de cette valeur par l'idée d'une filiation et d'une transmission, comme celui d'un héritage, celui produit par l'interaction des savoirs et des techniques, fruit du travail des chercheurs, théoriciens, expérimentateurs, et techniciens qui nous ont précédés. Il s'agit d'une œuvre humaine et collective, matérielle et intellectuelle, d'un savoir à faire croître y compris la mémoire d'erreurs narrées par l'histoire, où le savoir a été utilisé contre les droits

humains. Nous pensons en particulier au procès de Nuremberg pendant lequel des scientifiques ont été jugés pour s'être rendus complices de crimes contre l'humanité, ce qui a fait naître l'éthique biomédicale comme le rappelle Bruno Halioua (Halioua 2007).

Ceci rappelle que « science sans conscience n'est que ruine de l'âme », comme déclarait déjà Rabelais, et que la conscience est plus qu'un état et une stimulation cérébrale. Autrement dit, la mémoire permet de rappeler que l'avenir peut être bon ou mauvais avec les changements induits par les technosciences, selon l'usage qu'on en fait puisque, comme Hottois conclut : « la volonté humaine n'est pas, non plus tout à fait mauvaise (...) ». (Hottois 2004).

Justement, nous voudrions montrer qu'un espoir peut émerger de l'association entre science, technique, technologie, en mentionnant l'ingénierie, qui concerne l'étude de tous les paramètres, y compris économiques, des projets de recherche et de développement d'applications fondées sur les savoirs scientifiques, et en citant l'ingénierie verte, qui intègre la considération de l'environnement. On voit poindre ici une autre facette de notre problème : celui de l'éthique. A un certain niveau, l'éthique se voit comme invisée dans les choix technoscientifiques et se pose alors la question de l'articulation entre technosciences et valeurs.

3. Des façons de faire à l'intention : ingénieries et projets de société.

L'épistémologie de l'ingénierie traite des « savoirs propres à l'ingénieur. e ». L'ingénierie n'est pas du tout une discipline nouvelle : « Dans l'Antiquité, Dédale, le père d'Icare, était considéré comme le modèle de l'ingénieur-inventeur » (Dubois, Brault 2021). Archimède, Léonard de Vinci, et Bernard Palissy sont des figures emblématiques qui nous font penser à l'invention, et donc à la faculté d'imagination nécessaire à son émergence. Cette part d'invention est aujourd'hui présente dans les services intitulés : « recherche et développement ».

Ensuite, dans le manuel d'épistémologie pour ingénieurs, trois niveaux de savoir technique sont distingués et renvoyant aux trois niveaux aristotéliens: « l'épistémè, la technè, la poïesis ». (Dubois, Brault 2021). Puis, sont mentionnés « les créateurs » du savoir, les scientifiques théoriciens, comme « les praticiens du savoir formalisé, c'est-à-dire les ingénieurs qui conçoivent des produits ou des procédés », « les tenants du savoir-faire représentés par les artisans, les techniciens, et dans certains métiers par les ouvriers spécialisés », puis, les

ingénieurs, qui se trouvent à l'interface entre « les scientifiques et les techniciens ». (Dubois, Brault 2021).

De notre côté, ayant associé la science théorique et la science technicienne expérimentale et pratique, nous trouvons donc d'avantage l'ingénieur à l'interface entre les technosciences et les technologies. D'ailleurs, les auteurs définissent la connaissance technologique comme « la façon de faire ou de fabriquer des choses alors que la science a un objectif d'abord épistémique. » (Dubois, Brault 2021). L'ingénierie est donc au point de rencontre entre la connaissance technologique, des façons de faire, dans un domaine avec des instruments spécifiques, et des formes de savoirs scientifiques théoriques et techniques pouvant inclure plusieurs disciplines. Enfin, il est intéressant de mentionner la différence entre une découverte purement scientifique et la stratégie de la recherche et de développement qui consiste en un « bricolage (...) processus innovant intentionnel non planifié et l'ingénierie qui relève d'un processus planifié. » (Dubois, Brault 2021). Il y a donc la même intention de découvrir et la même faculté d'imagination, mais pas la même méthode. La science de l'ingénieur apparaît comme une médiation scientifique qui pourrait articuler, unifier, sans confondre, savoir et savoir-faire.

Du point de vue de la méthode, notons, tout d'abord, que la notion de planification peut renvoyer à la notion de computation, qui renvoie à son tour au calcul. Mais, le calcul n'est pas le seul élément nécessaire à la rationalité scientifique. Si l'exactitude d'un résultat est mentionnée par une équation mathématique, le résultat qualitatif semble plus subjectif. Pourtant, il relève aussi d'une méthode, qu'il s'agisse des modes d'acquisition des données, de la sélection des sources, tant au niveau de leur rigueur que de leur pertinence, du traitement objectif de l'information, de l'extraction de synthèses, etc. On ne quitte pas la sphère de la rationalité (scientifique) lorsqu'on n'est pas nécessairement confiné dans le monde de la calculabilité ! Comme on le voit déjà dans la manière dont raisonne Aristote, par exemple dans *L'Éthique à Nicomaque*, lorsqu'il s'agit de réfléchir à des problèmes de décision humaine (juridique, éthique) l'usage d'une méthode rigoureuse de la raison (soutenant le jugement de prudence, la *Phronêsis*) ne peut se réduire à la déduction conçue sur le modèle des mathématiques.

Ensuite, dans l'action même de calculer, il y a le choix des données, puis le calcul des données lui-même, le type d'opération, et enfin l'exploitation du résultat. Planifier ou calculer s'inscrit dans une perspective structurée autour d'une articulation logique qui permet de faire avancer la réflexion d'un point de départ défini à partir d'une problématique à un point final : la résolution

d'un problème. Il s'agit donc de faire les « bons » liens logiques entre des données en apparence disparates pour trouver une cohérence d'ensemble. Le but étant de réduire une complexité en essayant de trouver une grille de lecture fondée sur des bases simples. Les sciences computationnelles ont justement le même objet : « réduire la complexité des problèmes », (Marion 2017) en imitant, par exemple, l'activité neuronale par une modélisation qui la reproduit avec des neurones artificiels (Meyer 2019). Mais simuler un phénomène n'est nullement le comprendre. Et c'est bien là un point décisif. Il se pourrait comme le faisait remarquer Stuart Kauffman (Kauffman 2019) que dans des situations complexes (celles du vivant, de l'économie, de la psychologie, ...) on ne puisse pas identifier la moindre loi fondamentale de laquelle on pourrait tirer des explications et des prédictions, comme nous l'avons déjà évoqué.

Enfin, distinguons computation et pensée. Nous allons prendre pour référence le système computationnel qui comporte le plus de connexions, le web. Le web pourrait-il penser ? Bien-sûr, en l'état de nos connaissances et de nos technologies, cette question est digne d'un début de scénario de science-fiction et non de science. Cependant, il n'est pas de meilleur moyen pour savoir où l'on va arriver que d'observer la direction du chemin et, aujourd'hui, il n'est pas rare de voir que la science-fiction guide la recherche dans certains domaines de pointe !

En effet, par les réseaux sociaux, une masse considérable de données est enregistrée permettant d'indexer des pensées, des opinions, les types de personnalités, dont l'analyse permettrait d'enrichir la compréhension de la structuration psychique de l'humain, de la modéliser et de la reproduire en passant par le « web sémantique », qui consiste à tisser des toiles entre les données. Ces toiles ne seraient-elles pas une trame de pensée ? Aussi, cette direction du web pourrait faire penser à un rapprochement avec l'intelligence artificielle.

Cependant, Harry Halpin, philosophe du web, décrit la différence entre « web sémantique » et intelligence artificielle (IA). La distinction se fait sur l'aspect représentationnel. D'une part, sur le web, les représentations sont « encodées en langage machine, (...) et font appel à un réseau complexe de liens » et « leur signification dépend (...) de l'usage qu'en font les machines et les humains. » (Halpin, 2014). De plus, les liens du web reposent sur une architecture construite sur la base de trois éléments : « les URL, le protocole HTTP et les langages du Web ». L'URL correspond au lien saisi comme le « nom propre » d'un site web. On parle d'ailleurs de « nom de domaine ». Le protocole permet de transférer d'un endroit à l'autre des données sur des serveurs. Le langage correspond au mode de programmation. Par ailleurs, B. C. Smith avait imaginé « l'idée qu'un programme ou un langage puisse se prendre lui-même pour objet »

(Monnin 2020). Mais, l'association de l'idée de « réflexion » n'aboutit pas à cause de l'absence de perception, de conscience et de référentiel d'intériorité et d'extériorité. D'autre part, l'intelligence artificielle est un fonctionnement algorithmique, notamment comme en utilise les moteurs de recherche.

Par ailleurs, les cookies, qui collectent des données, génèrent un biais algorithmique, qui peut s'apparenter au biais cognitif, dans le sens où les suggestions vont toujours dans la même direction de pensée, ce qui ne permet pas de la stimuler et de la faire évoluer mais de la conforter. Cela n'engage donc pas sur le chemin de la réflexion. En fait, de nouveau, nous constatons que l'on est engagé non dans une compréhension fondamentale de la pensée ou de l'intelligence, mais dans sa reproduction, dans sa représentation algorithmique. On est alors confronté à l'alternative suivante : il faut soit admettre qu'il n'existe pas de théorie fondamentale de la pensée (sous la forme d'une structure déductive à partir de lois fondamentales), soit admettre que la seule façon de comprendre (ou que la façon spécifique de comprendre) les phénomènes complexes comme ceux que produisent la pensée et l'intelligence est la simulation. Dans les deux cas, il faut de nouveau renoncer au « mythe » d'une théorie ultime de type déductivo-nomologique. On pourrait suggérer ici qu'il existe un ordre de phénomènes pour lesquels une théorie partiellement ultime pourrait avoir du sens, la physique en livrant un exemple mais, il existe d'autres champs de phénomènes, complexes, contingents, où la théorie explicative doit laisser place aux seules simulations qui tentent de les reproduire. Cette réflexion sur la distinction entre la computation et la pensée, nous permet aussi de souligner, que l'une comme l'autre, nécessite une alimentation et que l'activité numérique est énergivore et polluante, de différentes manières, par exemple, par l'extraction de « matériaux rares, chers et non renouvelables comme le cuivre, l'or, l'argent. » (Daoud 2010).

Cependant, une prise de conscience de la pollution liée à l'usage du numérique commence seulement à se répandre. Cette prise de conscience citoyenne et les actions de l'ADEME ont influé dans les actions entrepreneuriales « éco-TIC », notamment en matière de recyclage des « e-déchets ». Cela nous ramène donc à un environnement plus large : l'environnement planétaire. Nous pouvons alors mentionner l'inclusion de l'environnement dans l'ingénierie. Plus qu'un objet, la stratégie de l'« ingénierie verte » consiste à « développer des procédés et des technologies » qui utilise des ressources « tout en préservant l'environnement » comme l'explique le journal du CNRS dans son article *L'ingénierie passe au vert*. Par exemple, l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, créée en France en 1991, conçoit des analyses sur l'impact environnemental de certaines techniques et encourage les perspectives innovantes en faveur de la protection environnementale. Parmi ces innovations,

dans son journal, le CNRS présente un dossier sur ce secteur en plein essor qui use du meilleur des connaissances scientifiques théoriques et techniques pour répondre aux besoins de l'humain en respectant son environnement (Bettayeb 2019).

Cet axe de recherche est donc une incarnation de l'intelligence au sens plus complet que celui de l'intelligence calculatoire. Il s'agit alors de progresser avec un recul sur nos modes de vies, nos manières de produire et nos types de productions et non pas comme l'« intelligence » d'une calculatrice qui ne sait pas ce qu'elle calcule, qui n'a pas conscience de ce qu'elle fait, qui ne comprend pas. Encore une fois, nous voyons par le biais des questions posées par une simulation énergivore qu'à un certain niveau, il nous faut intégrer dans notre synthèse des savoirs des discours éthiques qui loin d'être parachutés artificiellement sur les savoirs techniques sont au contraire suscités par eux.

Mais, la crainte d'un progrès incontrôlé, comme le décrit Ellul est parfois augmentée par le progrès des connaissances générant des intelligences artificielles et leur intégration dans la robotique. D'un autre, cette orientation que prend la recherche donne l'espoir à certains qu'une mutation de notre espèce et un changement d'environnement de vie de la Terre à l'espace pourraient se produire. Hottois rappelle cet idéal de certains que « la conquête de l'espace » ou « la dissémination cosmique de l'espèce humaine » (Hottois 2004) pourraient résoudre des problèmes. Mais qui s'embarquera pour fuir de la Terre ? Quelle sera la place des animaux ? Serons-nous comme Noé avant le déluge ? Quels seront nos choix pour sélectionner les vies qui doivent survivre ? Quelle hiérarchie commandera cette sélection ?

Aujourd'hui, de nombreux penseurs remettent en question la supériorité, présumée, de notre espèce en constatant le sort qu'elle réserve aux autres. Pour n'en citer qu'une, mentionnons les travaux de la philosophe française Corine Pelluchon. Dans son livre *Les Lumières à l'âge du vivant*, elle invite à penser une société démocratique et écologique. Dans un autre ouvrage, *Manifeste animaliste : politiser la cause animale*, sa réflexion montre que « la cause animale est la cause de l'humanité ». Elle s'explique en montrant que la violence faite à l'encontre des animaux est révélatrice des malaises de notre société. Elle met en lumière un système d'exploitation, dans le sens de profiter et non de mettre en valeur, puisqu'elle réduit à l'état de matière des êtres conscients. Ils sont considérés par certains humains comme de la matière première pour assouvir leurs besoins, leurs envies.

En plus, la consommation des humains est anarchique. Ils produisent plus qu'ils ne consomment (gaspillage alimentaire) et, paradoxalement, ils ne permettent pas à tous de consommer

(injustice sociale) ou produisent dans des conditions d'exploitation d'autres humains (conditions de travail, emploi des enfants, etc.). Déjà, dans son manifeste, cette philosophie éveille à cette problématique autour de la question animale afin de construire une société plus juste prenant en compte « les intérêts des humains et ceux des animaux ». ⁵⁹ Alors, pour terminer, sur la question environnementale et le respect de la biodiversité, aller coloniser une autre planète après avoir ruiné la nôtre semble assez questionnable. Mais, puisque la mort du soleil n'est pas prévue avant quelques milliards d'années, il est envisageable que l'humain évolue peut-être à travers des modifications matérielles, mais aussi intellectuelles, et fasse preuve de moins d'égoïsme. Cela nous ramène à la question des valeurs.

On pourrait de nouveau s'étonner de ce détour par les questions environnementales en plein cœur d'une réflexion sur les contours que peut prendre un projet unificateur des savoirs. Mais, en fait, ce détour est parfaitement justifié par le fait suivant. Une volonté d'unifier totalement les savoirs peut dans le cas des sciences « pures » cacher le fait, bien apparent dans les sciences de l'ingénieur, que le savoir appliqué ne peut se départir d'un projet de société et de la considération des retombées socio-politique de la techno-science. Une centrale nucléaire, un réseau comme Internet, etc. n'est pas seulement un pur objet technique que l'on pourrait comprendre seulement mathématiquement. Il est un objet « socio-technique » : il génère un type de société (la société de l'information, de la consommation, ...), influence des décisions politiques et est porteur d'une finalité comme nous l'avons dit. Qui voudrait vraiment comprendre le web, les centrales nucléaires, le développement de la robotique, ne peut se contenter d'une seule discipline. Bien sûr, la mécanique et l'électronique expliqueront beaucoup d'aspects d'un drone militaire, par exemple, mais pour en comprendre ultimement l'évolution, les caractéristiques, etc., il nous faudra croiser les technosciences avec les sciences qui décrivent la géopolitique, par exemple, les sciences du comportement humain, l'histoire, ... (pour expliquer, par exemple, pourquoi le refus de perdre des vies dans un camp induit le recours à des véhicules non-habités ; pourquoi une société de la surveillance multiplie les techniques furtives...)

On voit bien que si l'on prend au sérieux et de manière radicale le projet d'une compréhension ultime, il faut nécessairement, dans le cas des objets « socio-techniques », aller bien au-delà du modèle déductivo-nomologique, dont le paradigme serait celui de la physique. L'épistémologie des sciences de l'ingénieur est un bon lieu pour penser une autre manière d'appréhender

⁵⁹ A propos de C. Pelluchon, *Manifeste animaliste. Politiser la cause animale*. Alma, pp.111, Jean-Maurice de Montremy, 978-2-36276-213-7. (hal-01532504) », HAL, 2017 (en ligne : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01532504>)

l'explication ultime ou plutôt pour la remettre en question dès lors que l'on n'aurait en vue que le modèle de la physique théorique. Tout un débat sur la charge éthique ou idéologique des paradigmes scientifiques et technoscientifiques devrait être mené. Il n'est pas aisé, car d'ordinaire, on a séparé science et valeur, raison théorique et raison pratique. Cependant, un certain nombre de situations technoscientifiques récentes montrent qu'on ne peut comprendre ces situations qu'en articulant les situations épistémiques et éthiques. (Ladrière 2017).

4. Les processus de décision individuels et collectifs : intérêts communs, valeurs individuelles et archétypes.

Comme nous venons de conclure, intégrer les types d'ingénierie à notre réflexion montre le lien entre sciences, techniques, technologies et projets de société. La finalité de l'ensemble étant au service d'une vision commune, autour de projets collectifs. L'essence même d'un collectif est d'avoir une finalité. Nous allons donc évoquer la raison d'être des collectifs par son fonctionnement général. Puis, nous analyserons ceux qui les constituent, les individus. Enfin, nous en viendrons à un dénominateur commun, ce qui constitue « l'élémentarité » de l'esprit, qui possède un fonctionnement mental, un fonctionnement psychique, de possibles relations et une capacité évolutive. Nous terminerons donc sur la notion essentielle d'historicité.

Partons de l'idée qu'un collectif possède une volonté générale. Une volonté générale est relative à une cohésion d'ensemble, où l'ensemble est le peuple en philosophie politique. Le peuple est le plus souvent signifié par l'instinct grégaire de territoire. D'une façon vraiment générale, on peut se considérer comme un habitant de l'univers, et étant donné notre mode d'être vivant, on peut se considérer plus particulièrement comme un habitant de la Terre. Mais ces considérations générales ne suffisent pas dans la réalité humaine, car il existe de nombreux sous-ensembles, de collectifs, dont les raisons d'être sont différents. Ils ne sont pas animés que par des valeurs mais aussi par des intérêts particuliers.

Alors, du « contrat social », où la finalité est la « volonté générale », comme l'explique Rousseau dans l'ouvrage du même nom, nous en venons avec ce philosophe des Lumières à la question de l'éducation. Quelles valeurs transmet-on par l'éducation ? Dans *Émile, ou De l'éducation*, Rousseau rappelle qu'il s'agit de ne pas se couper de notre source : la nature. Selon son analyse, se rapprocher de la nature correspond à se reconnecter à notre état naturel, sauvage. Cette volonté est motivée par le fait que Rousseau considère que la société est pervertie et que

la perversion est caractérisée par l'inégalité et l'inégalité est causée par la propriété privée. De fait, les possessions sont différentes selon les individus, et nous avons déjà soulevé ce point avec Marx, qui ouvre sur un modèle politique : le communisme. Mais, comment se réalise ce modèle, cette mise en commun ? Par un contrôle étatique qui restreint fortement les libertés individuelles. Nous nous heurtons ici à une augmentation d'un pouvoir, celui de l'État, et à une diminution d'un autre pouvoir, celui des individus. Ce jeu de pouvoirs est en somme la marche de la réalité humaine, car les intérêts particuliers de l'un ne sont pas forcément ceux de l'autre. L'un A va donc rejoindre un autre, C, qui possède les mêmes intérêts. L'autre B va rejoindre un autre, D, qui possède les mêmes intérêts, mais opposés à A et C. Deux collectifs vont donc naître, le premier à cause d'intérêts communs, et le second à causes d'intérêts opposés : A+C et B+D, puis AC contre BD. Ensuite, la distribution de la force entre les deux va être relative aux moyens de pression (lobbying). Avec la guerre actuelle entre la Russie et l'Ukraine, nous voyons que la pression des états soutenant l'Ukraine est une pression économique. La marche de la réalité humaine est donc aujourd'hui relative au fonctionnement économique.

Initialement, l'économie est la circulation des richesses. Pour l'Ukraine, actuellement, la richesse est de posséder des armes, pour défendre son territoire. Nous en revenons donc à Rousseau, qui évoque que la possession engendre tous les maux, mais la possession est ici relative au territoire. Or, la notion de territorialité est fondamentale pour les peuples depuis qu'ils sont passés de l'état nomade à l'état sédentaire. Cependant, cette sédentarité est relative au fait de trouver un lieu où il fait bon vivre, où toutes les conditions sont réunies pour pouvoir survivre et s'épanouir. Ainsi, factuellement, l'humanité est composée d'une diversité de collectifs, dont les raisons d'être sont différentes et les intérêts parfois communs ou opposés. Alors, pour que communiquent ces diversités, il faut instaurer des lois et les faire respecter. Le premier droit semble celui de vivre. Maintenant qu'on est là, qu'on vit, on a le droit de continuer à vivre. Pour vivre, il faut avoir le droit de naître, mais la volonté de faire naître, ou non, est relatif au choix des individus. Ainsi, des droits et des libertés fondamentales ont été établies, mais ils ne concernent, pour le moment, que les humains.

Enfin, les collectifs humains sont composés d'individus et leurs raisons d'être sont aussi différentes, en fonction d'appétence ou de valeurs variables. Nous comprenons donc que les collectifs ont des finalités différentes en fonction de la nature de leur action et de leur motivation à se réunir pour agir, à savoir l'intérêt. Et, la question de l'intérêt peut être déplacée et posée à l'individu autour de la question de l'intérêt de vivre. La survie est un instinct, mais pas une raison, comme l'instinct de reproduction est lié à l'instinct de survie. Ainsi, beaucoup se reproduisent sans se demander pourquoi, ou bien ils décident de se reproduire justement pour

donner un sens à leur existence, en ayant une continuité, une personne à qui transmettre ses valeurs, une personne à s'occuper, à chérir et qui, généralement les chérit en retour. Dès lors, les raisons pour lesquelles on naît peuvent être variées, comme les raisons qu'on se trouve pour justifier le fait de continuer à vivre. Elles peuvent être relatives à ce qui nous soucie, pour reprendre l'idée d'Heidegger. Il peut s'agir d'occupations, s'occuper de quelqu'un ou de quelque chose, mais ces occupations vont être motivées par des valeurs, ici, donner la vie, transmettre des idées ou produire un être dont la raison est l'amour entre deux êtres, qui s'aiment, car ils trouvent en l'autre une particularité et une correspondance. Intéressons-nous succinctement, pour conclure, à la diversité de valeurs, à leur hiérarchisation et à leur fondement.

Déjà quelles pourraient-être les valeurs qui caractérisent le mieux notre singularité parmi les autres vivants ? A cette question, on serait tenté de répondre par la subjectivité, en mentionnant les nôtres. A cette question, Changeux tente de répondre en décrivant trois d'entre elles : le vrai, le beau et le bien, en conjuguant les connaissances de plusieurs disciplines dans l'ouvrage du même titre (Changeux 2008). Mais, même si cet ouvrage est très riche et ouvre sur une dimension anthropologique très instructive, il s'avère insuffisant face à la réflexion plus profonde que peut générer ces trois valeurs.

Or, justement, la philosophie et la diversité de ses branches permet une réflexion approfondie par l'analyse des relations conceptuelles. Par une réflexion philosophique, nous comprenons que le vrai, en tant que relation à l'être de la chose, au réel (*res ; veritas est adequatio rei et intellectus*) renvoie à la question de l'absolu et donc à une branche de la philosophie, la philosophie première, mais aussi dans un questionnement plus radical, remontant à l'origine de l'être, à la théologie, aux religions et aux spiritualités (Jankélévitch 1986). Le beau renvoie à une autre branche de la philosophie, l'esthétique, qui peut avoir une résonance dans le réel par la contemplation de l'harmonie des formes et des couleurs dans les paysages par exemple. (Lacroix 2018). Enfin, le bien renvoie à la philosophie morale, à l'éthique et aux déontologies. Le bien est donc relatif à l'agent qui fait le bien. Mais ce qui paraît bien à un individu peut être relatif à la définition commune, et donc sociétale, du bien (Bègue 2011). Or, le bien peut être plus difficile à cerner à l'échelle d'une société multiculturelle, comme en fait état Axel Khan dans *Et le bien dans tout ça ?* Ainsi, le bien peut être défini par une morale individuelle, en fonction de la propre définition d'un individu d'un comportement vertueux (Comte-Sponville 1995) Car, la détermination d'un comportement vertueux est subjective. A ce propos nous renvoyons à deux ouvrages de journalistes au fait de cette possible *Dictature des vertueux* (Quemener 2022) et de cette *Guerre des idées* (Bastie 2021).

Ainsi, comme l'explique la philosophe Christine Tappolet, qu'il s'agisse de vertus ou de valeurs, elles touchent un référentiel affectif : « les émotions nous permettent d'avoir conscience de certaines valeurs, celles qui correspondent aux concepts affectifs. » (Tappolet 2000). Ainsi, l'autrice de *Emotions et valeurs* s'inscrit dans une épistémologie des valeurs, l'axiologie, à contre-courant, notamment de celle du « cohérentisme », du « fondationnalisme », et du « réflexionnisme », qui se fondent sur le rationalisme. En effet, Tappolet propose une « épistémologie expérimentaliste », qui se « caractérise par une valorisation des émotions ». Dès lors, il semblerait que les valeurs nous divisent plus qu'elles nous unissent, car certains, par exemple, préfèrent vivre sans liberté et d'autres préfèrent mourir plutôt que de perdre leur liberté, en sachant que la définition même de la liberté est très subjective. Finalement, dans la hiérarchie des valeurs, il y a donc une primauté donnée à un idéal, donc inatteignable, mais néanmoins recherché, à un horizon. Analysons donc, à présent, cet horizon : l'idéal.

Le moteur de l'existence individuelle est lié à l'identification d'un idéal représentant un référentiel de valeurs. Or, nous pensons, comme Tappolet, que les valeurs choisies sont celles qui nous touchent en fonction de notre histoire de vie et de nos réflexions. Alors, l'idéal est paradoxalement relatif au réel perçu. Le réel perçu correspond à l'entourage, constitué de fréquentations. Mais, l'entourage, le substrat, peut être changé en fonction de la construction d'un idéal, lié à une profonde réflexion personnelle sur ses propres a priori construits à partir de l'enfance. Qu'est-ce qui détermine l'entourage d'un individu ? Un lieu de vie, le milieu, des activités (physiologiques, familiales, amicales, lucratives ou selon ses appétences), les préoccupations des individus que l'on rencontre lors de ces activités. Or, par la volonté, on peut avoir une influence sur ces paramètres et même en changer à cause de cet idéal qui fait sortir du réel perçu pour se diriger à la découverte d'autre chose. Dans le livre de Stuart Kauffman cité, ce moteur dans le vivant serait de considérer tout comme une opportunité. Il illustre cette proposition en retraçant l'évolution de la vie élémentaire.

Ajoutons que l'idéal est ce qui engendre l'envie. Or, l'envie est dû à un manque. L'idéal est donc ce qui va manquer dans le réel perçu que l'on va alors chercher par l'action afin de combler ce manque. Il y a donc des besoins que l'on assouvit, des envies que l'on satisfait et des désirs qui, au-delà de l'envie et le fait de combler un manque, vont apporter un plaisir. Le désir ne répond donc pas à une fin première, répondre à un besoin, par exemple, manger pour vivre. Le désir ne correspond pas à une envie, par exemple, manger sainement pour retrouver la santé. Mais le désir est généré par l'idée de la sensation agréable que produira l'action, par exemple,

manger du sucre. Le désir est donc généré par la volonté de ressentir une sensation agréable immédiatement, alors que l'envie est relative à une motivation induite par une carence. Le désir de manger du sucre peut correspondre à une situation où elle correspond aussi à une envie, répondre à une carence (hypoglycémie). Mais, certains désirs peuvent être désordonnés ou excessifs, ne manger que du sucre ou trop de sucre, par exemple. L'individu est donc mu par des valeurs, mais aussi en fonction de l'évolution entre ses besoins, ses envies (carences) et ses désirs (ce qui va lui faire plaisir, lui être agréable).

Le comportement individuel général est la personnalité. La littérature peut être un moyen de décrire, de manière fictive, les possibles types de personnalités, de tempéraments, des scénarios de vie et la réalité humaine, psychique et sociale. Pensons en particulier à Balzac et à Zola. D'un point de vue scientifique, la personnalité est décrite à travers des traits, en psychologie de la personnalité.⁶⁰ Elle correspond à ce que l'individu montre de lui-même. Elle réfère donc au comportement extérieur, mais cette extériorité est à mettre en correspondance avec un fonctionnement interne. Le fonctionnement interne est décrit par la neuropsychiatrie. La psychiatrie étudie les normes, hors-normes et troubles mentaux, il existe une diversité d'états mentaux, et leur association à la dimension neuronale donne une explication entre les états mentaux et les connections neuronales⁶¹. Mais, définir un état mental renvoie, d'une part, à la correspondance entre une idée et un réfèrent, d'autre part, à la nécessité de souligner la diversité des fonctions cognitives. Sur le premier point, nous voudrions citer un article du philosophe Denis Sauvé intitulé « *Signification et états mentaux : à propos de l'« antireprésentationnalisme » de Wittgenstein* ». Dans celui-ci, il exprime la nuance de la pensée de Wittgenstein sur le langage en ces termes :

Il y a « des expressions dans la langue qui désignent des choses (...), des substantifs qui réfèrent à des objets, des verbes auxquels correspondent des états, activités ou processus et des énoncés qui décrivent des états de choses. D'autres expressions ne remplissent pas une fonction référentielle ; (...) C'est vrai également d'un certain nombre de verbes psychologiques tels que « comprendre », « connaître », « savoir », « croire », « avoir une certaine intention », « attendre » ou « espérer ». En dépit de ce que suggère la grammaire courante, ces verbes n'ont pas pour fonction de référer à quelque chose, ni à des états ou processus ayant leur siège dans le système nerveux, ni à des états ou processus hypothétiques de l'« appareil psychique ». » (Sauvé 1998).

⁶⁰ A ce sujet, nous renvoyons vers l'ouvrage M. Hansenne, *Psychologie de la personnalité*, Louvain la neuve, Belgique, De Boeck, 2015.

⁶¹ A ce sujet, nous renvoyons vers l'ouvrage D. Purves *et al.*, *Neurosciences*, Bruxelles, Belgique, De Boeck Supérieur, 2019.

A ce propos, nous voudrions distinguer l'activité psychique, qui est plus globale et intègre les émotions, de l'activité mentale, qui est relative aux fonctions cognitives. Il est aussi possible d'analyser leur lien en fonction des états d'esprit, principalement fixiste (fermé à l'évolution des croyances et à l'intégration de nouvelles connaissances) ou évolutif (ouvert à l'apprentissage et à la découverte). Comme nous l'avons vu, l'activité psychique est relative à des éléments chimiques, des circuits neuronaux et à des représentations mentales, subjectives, relatives au vécu individuel et à des états mentaux qui fonctionnent à partir de construction conceptuelle permettant d'effectuer les diverses fonctions cognitives, qui elles, ne renvoient pas directement à des référents concrets : le calcul, la mémorisation, le choix de concentration de l'attention, le sens de l'orientation, la cognition sociale (s'adapter à diverses situations sociales)....Ainsi, ce que nous voudrions souligner ici, c'est que les notions de représentation mentale et de concept sont utiles et nécessaires, mais insuffisantes pour décrire le fonctionnement de l'esprit.

En effet, pour décrire complètement le fonctionnement de l'esprit, il faudrait décrire tous les états psychiques qui intègrent la palette des émotions, les dispositions (états d'esprits qui évoluent selon les situations) et tous les états mentaux qui impliqueraient de comprendre le fonctionnement de chaque fonction cognitive, leur interaction et les liens éventuels entre l'activité psychique et l'activité mentale. Il s'agirait aussi de connaître complètement les types d'intelligence, en intégrant notamment celle des éléphants et des cétacés, puisque nous avons vu que la forme de l'organe influait sur les fonctions.

Or, la forme originale du cerveau des cétacés, par exemple, est source de recherche et révèle, en particulier, d'importantes facultés d'apprentissage. Certains cétacés sont même utilisés à des fins militaires, étant donné leur intelligence et leur capacité de coopération inter-espèce. Mais les conditionnements ne permettent pas d'évaluer tout le potentiel des individus. D'ailleurs, on prête au commandant Cousteau cette réflexion pertinente selon laquelle étudier des cétacés en captivité reviendrait à étudier seulement des individus isolés, comme des prisonniers. En effet, nous ne connaissons pas tous les potentiels des fonctions cognitives dans des conditions hors-normes. Certains chercheurs se penchent sur la question afin de comprendre ces fonctionnements dans des conditions extrêmes, mais il n'est pas possible d'envisager toutes les nouvelles conditions dans lesquelles nous pourrions être, d'autant plus que les conditions de vie sont généralement normées dans les sociétés actuelles.

Enfin, puisque le cerveau continue de se développer après la naissance, il faudrait aussi analyser toutes les formes possibles d'apprentissage. Nous avons donc encore beaucoup de choses à découvrir et nous ne pourrions pas tout savoir car, comme l'exprime Kauffman il faut reconnaître de l'imprévisible et donc de l'impréconcevable. Nous comprenons donc qu'une théorie du « tout » relative à l'esprit, qui décrirait l'ensemble des fonctionnements psychiques, devrait intégrer de nombreux paramètres et processus pour arriver à une norme, une description globale en termes de loi, dont on semble encore loin et qui est peut-être impossible, face à la diversité des pensées et des individus. Pour conclure sur ce point, ayant pour objet un état de la diversité des intérêts communs et des valeurs individuelles aboutissant à une caractérisation des divers éléments nécessaires mais insuffisants pour aboutir actuellement à une compréhension complète de l'esprit, nous voudrions insister sur deux points émergents : la notion de sujet, relative aux processus de décisions, et à l'importance de l'historicité.

Tout d'abord, on pourrait dire que la vie du sujet ne va pas sans la prise en compte de la liberté et de la capacité de décision. Mais, l'évaluation des décisions qui président à l'action demande des références soit à des intérêts, soit à des valeurs. Dès lors, une compréhension des processus de décision demanderait une intelligence profonde de la liberté (ou de la nécessité), des intentions et des valeurs. Il fait donc intervenir justement des éléments qui relèvent non pas de l'objet mais du sujet, alors que le paradigme de l'unification des sciences ne se conçoit que si le réel est réduit à un objet ou à un phénomène (dont l'entendement scientifique pourrait s'emparer).

Nous retrouvons ici ce que nous avons vu pour le vivant et son évolution, il semble impossible de prédire avec certitude une décision, étant donné que l'ensemble des possibles décisionnels, n'est pas toujours entièrement cernable (il est comme le dit Kauffman « impréconcevable »). La contingence et la singularité unique et personnelle de la décision dominent ce champ, empêchant la mise en évidence d'éléments répétables, universels, etc., c'est-à-dire empêchant l'identification de variables « stables », « invariantes » qui permettraient une prédiction ou une mesure. Rappelons que c'est justement la mise en évidence d'invariants (et des symétries associées) qui permet à la physique de formuler des lois et d'obtenir une mathématisation efficace menant à l'idée pertinente dans ce cas d'une théorie unificatrice.

Dans ce sens, il serait intéressant de citer le rapprochement possible entre les incertitudes enjeu dans la théorie quantique, et ce qui produit dans le cerveau la variation stochastique du comportement. C'est ce que fait Michel Bitbol dans le chapitre *La théorie néo-classique de la mesure : un cadre pour les sciences du comportement* Il explique l'« incertitude irréductible

dans les comportements » à partir de « (...) la propriété de non-orthogonalité (connectivité) des états purs (correspondants à des propriétés psychologiques ou des caractéristiques de types incompatibles). » Alors, il s'agit de décrire formellement des propriétés psychologiques et de préciser de quelle incertitude il s'agit (quelles sont les variables). Dans le dernier chapitre, *théorie néo-classique de l'utilité espérée*, il explique que cela permet de « considérer des situations où l'incertitude pertinente à la prise de décision est de nature non-classique. » (Bitbol 2009).

Cependant, il faudrait une discussion détaillée et critique pour voir si les ensembles d'évènements stochastiques dont on parle peuvent être ou non identifiables et munis d'une mesure adéquate de probabilité. Ainsi, nous comprenons que cette description serait contextuelle, relative à une situation. Mais, les décisions sont de divers ordres et quasi-permanentes dans la vie d'un individu, des plus insignifiantes, en apparence, à celles qui peuvent sembler les plus déterminantes. Or, il s'agit parfois d'un seul détail, d'un imprévu, pour que le cours d'une histoire change de direction.

L'histoire peut se rationaliser a posteriori, mais il n'y a pas de théorie prédictive et unitaire de l'histoire individuelle. Il y a des prédictions comportementales, des tendances, mais pas de certitude, de déterminisme. Il existe donc une part imprévisible dans l'histoire individuelle. Comme l'avait montré Ilia Prigogine dans *La nouvelle alliance*, la physique classique n'avait pas tenu compte de l'histoire, mais celle-ci est une des dimensions fondamentales de tout l'univers, de la vie, de la pensée et des sociétés. La volonté de compréhension unificatrice de la connaissance qui laisserait donc de côté l'histoire serait *ipso facto* auto-contradictoire (car elle prétendrait unifier le tout alors que de fait elle laisse de côté un élément crucial). La physique (quantique ou autre) peut en tenir compte, mais elle ne peut pas anticiper toutes les ramifications qui émergeront de l'arbre de vie d'un individu et d'une branche de l'arbre du vivant, l'humain. Nous arrivons à un point fondamental. Nous avons donné un certain nombre d'obstacles à la constitution d'une théorie unifiant les connaissances dans diverses disciplines. Ici, nous touchons à un obstacle conceptuel majeur : lorsque l'historicité devient un point essentiel de la caractérisation de l'évolution d'un système, le devenir de celui-ci est largement hors-portée d'une formalisation nomologique (les lois) ou mathématique. Il n'existe donc plus une « théorie » de son devenir qui pourtant devrait entrer dans une description ultime de ce qu'il est !

Pour conclure, cela nous amène à citer un autre paramètre important, l'inconscient, et la compréhension actuelle de son fonctionnement, en partie transmise à travers les travaux de

Lionel Naccache, spécialiste des neurosciences cognitives. Dans l'ouvrage précité, il explique notamment que la réalité psychique d'un sujet correspond à sa conviction en son interprétation de « sa vie mentale inconsciente à la lumière de ses croyances conscientes. », autrement dit, ce que le sujet croit être individuellement et collectivement. La croyance de ce que l'on est met en toile de fond la question de la volonté de ce que l'on veut être, et donc la question du libre arbitre ou « liberté mentale ». Cela met aussi en perspective l'inconscient collectif. Ce pas conceptuel entre l'inconscient personnel et l'inconscient collectif est franchi par Jung. Il permet d'ouvrir sur la question des archétypes communs et donc sur un tout autre domaine : l'anthropologie. Comme le souligne Jacques Galinier : « Il faut lire *Le Nouvel Inconscient* pour comprendre à quel point le conflit autour des sciences de la cognition comme nouvelle frontière de l'anthropologie nous concerne tous. »

Conclusion du chapitre 2.

La pratique individuelle de la science en fonction de valeurs et sa pratique collective en fonction d'un modèle politique, économique et social.

Dans ce chapitre, nous avons analysé des fondements possibles à partir desquels articuler une diversité de savoirs. Nous avons aussi réfléchi aux finalités des savoirs en associant deux dimensions, philosophique (par l'analyse conceptuelle) et sociologique (par l'analyse du fonctionnement d'une société, étant le milieu de production et d'utilisation des savoirs). En mentionnant les applications techniques et les technologies qui émergent, nous avons vu qu'elles dépendent de l'intention de leurs usages et de leurs usages effectifs.

Or, l'usage des sciences et des techniques est relatif à un projet de société fondé sur des intérêts communs et des valeurs individuelles. Par exemple, les connaissances sur le fonctionnement du corps humain peuvent servir à soigner tous les humains, ou bien seulement quelques humains, en contrepartie d'une monétisation des soins. Si les soins sont gratuits, il faut définir comment seront rémunérés les médecins et chirurgiens. De même, si la science progresse, quelle que soit la discipline, c'est parce qu'elle est financée, puisque les chercheurs ont aussi besoin d'une rémunération. La production des connaissances est donc liée à l'action humaine collective et globale, qui comporte d'autres dimensions telles que le régime politique, le modèle social, économique, etc. Le financement de la recherche ouvre sur la question d'une nécessaire réflexion sur l'éthique de la recherche et d'une procédure de vérification de son application, car nous avons aussi souligné les responsabilités liées à l'usage des savoirs en suivant l'analyse d'Hottois.

A partir d'une réflexion sur la hiérarchisation dans un référentiel de valeurs, nous avons identifié que la quête de vérité sous-tend généralement l'activité scientifique. Or, la quête philosophique possède une autre fin. Initialement, elle est associée à la quête de la sagesse. Ainsi, elle ne nie pas l'utilité d'une quête de vérité, mais elle questionne aussi les conséquences de cette recherche de la vérité. La sagesse est souvent associée à un itinéraire de réflexion personnelle qui engendre des attitudes et un rapport au monde qui n'est pas forcément dans la norme d'une société. La quête de la sagesse est observable à travers la diversité des cultures.

Elle peut donc être considérée comme une valeur universelle, car, au fond, elle pose des questions sur le meilleur comportement individuel et collectif à adopter en fonction de situations variables. Elle vise essentiellement à ne pas privilégier les intérêts particuliers au détriment de l'intérêt général, du bien-commun. La sagesse ouvre sur le respect de la diversité, sous toutes ses formes, y compris la diversité de valeurs, car les individus et les sociétés s'identifient à un référentiel de valeurs et ces valeurs sont différentes selon les époques et les groupes humains.

Parmi ces valeurs, il est seulement possible de souligner que certaines ont permis à l'humain de prospérer. Privilégier la connaissance a permis de progresser dans toutes sortes de domaines. Privilégier la collaboration a permis de constituer des sociétés autour de projets communs, initialement celui de survivre, puis d'améliorer ses conditions de vie. Cependant, cette collaboration a été souvent considérée uniquement entre humains, les autres vivants-conscients étant exclus et déconsidérés. Ainsi, choisir l'humain comme absolu a conduit à négliger le lien vital entre l'humain et son milieu. L'humain fait partie d'un ensemble, l'ensemble des vivants. Certes, il possède davantage de facultés, mais il ne peut subsister sans les ressources naturelles. Or, la bonne gestion des ressources naturelles passe par le respect de l'environnement et de la biodiversité. Une « nouvelle alliance » est donc à réaliser entre l'humain et la nature. Pour cela, l'usage de nouveaux outils seront déterminants, dont celui des ingénieries et des applications de l'intelligence artificielle, et le facteur déterminant sera la volonté collective. L'avenir est donc incertain et la sagesse suspend son jugement sur le cours du devenir.

Enfin, la sagesse apparaît aussi ici comme ce qui désigne l'attitude qui empêche la clôture totalisante d'un système de connaissances qui s'enfermerait dans sa cohérence interne. La sagesse permet d'échapper à un enfermement épistémologique : qui réduirait toute explication à une seule discipline, à une seule connaissance particulière ; qui exclurait toute dimension extra-épistémique (éthique, esthétique, ...) ne retenant que les objets pouvant être décrits par cette connaissance. Si la science et la technologie doivent progresser dans leur champ propre, la sagesse est cette attitude qui brise le cercle de la clôture totalisante d'une pensée qui s'imaginerait dominer une explication ultime dans un seul champ du savoir. Nous comprenons donc ici le sens de la sagesse dans la démarche que nous avons suivie jusqu'ici.

Précisons quelque peu ce point. La sagesse comme attitude proprement philosophique ne consiste pas à refuser les théories unifiant les savoirs dès lors que cela est logiquement possible et empiriquement efficace. Elle consiste à récuser pour des raisons d'incohérence logique et d'inconsistance épistémologique la réduction à des schémas explicatifs totalisants prétendant

absorber toute la diversité et la richesse phénoménale. Cette sagesse a une dimension éthique, car revendiquer la clôture de la représentation du « tout » du réel revient à exclure ce qui pourrait remettre en question les présupposés d'un moment ou d'inspirer des événements créatifs susceptibles d'ouvrir les horizons. Cette conclusion reviendrait alors à mutiler le réel, le vivant, l'humain en le confinant dans des carcans. C'est cela qui explique que notre travail débouche sur une véritable éthique de la pensée scientifique et technoscientifique rejoignant peut-être la pensée de Bergson dans *Les deux sources de la morale et de la religion*, où le philosophe dénonce ces « blocages » évolutifs que sont les « sociétés » et les « morales closes », on voudrait ajouter ici les représentations du monde trop vite clôturées en tant qu'ultimes.

Nous comprenons donc qu'il n'est pas possible de décrire un réel actuel exclusivement objectif, en fonction d'archétypes conceptuels d'une seule nature. Il faut faire intervenir, pour rendre compte de la richesse de notre expérience, un réel subjectif symbolique individuel fonction du vécu, des ressentis. Les archétypes des sciences peuvent renvoyer à plusieurs faits irréductibles :

- Le fait physique, qui décrit le fonctionnement de la matière dans l'univers observable.
- Le fait biologique, qui décrit le fonctionnement du vivant.
- Le fait psychique, qui décrit le fonctionnement des représentations mentales d'un individu doté de facultés perceptives et cognitives.
- Le fait social, qui décrit le fonctionnement des individus au sein de groupes sociaux, de collectifs.

Ainsi, nous pouvons distinguer le réel « objectif » qui est un réel factuel (constitués de faits représentés dans et par des sciences particulières) à l'opposé d'un réel « subjectif symbolique », qui constitue le référent de la narration des ressentis, des émotions d'un sujet. Le réel factuel peut faire l'objet d'une description et d'une explication sur base d'une objectivation, d'une mise à distance d'un objet que l'on regarde de l'extérieur comme en surplomb, alors que le réel émotionnel dépend de l'histoire et du vécu individuels. A ce propos, nous renvoyons à la rose du petit prince de Saint Exupéry. Pourquoi ce renard et cette rose sont-ils particuliers, pourquoi ne se confondent-ils pas avec les autres du même type ? Parce qu'ils ont entretenu une relation attentionnelle et émotionnelle, dont la logique et les mathématiques ne pourraient pas dire grand-chose et qui consiste à être en présence de l'autre, attentif à l'autre, avec une envie de découvrir ses besoins, ses désirs, son monde intérieur.

Conclusion partie III.

L'alternative philosophique :

La totalisation en fonction d'un principe ou la description des effets émergents.

Pour conclure cette troisième partie, où nous avons analysé une diversité possible de fondements et de finalités, rappelons la raison d'être de la philosophie. La philosophie est un usage de la raison qui tente de remonter aux conditions les plus fondamentales de l'être et des êtres. Dans cette recherche, elle peut aussi, comme la science, se transformer parfois en pensée totalisante voulant à tout prix résorber toute la richesse des êtres en se basant sur un unique principe conceptuel. Mais la raison n'oblige nullement à accepter cette manière de penser. En effet, on pourrait admettre que les êtres forment une pluralité d'essences descriptibles par une diversité irréductible de disciplines articulables néanmoins d'un point de vue logique. C'est ce que nous avons tenté de décrire dans cette thèse.

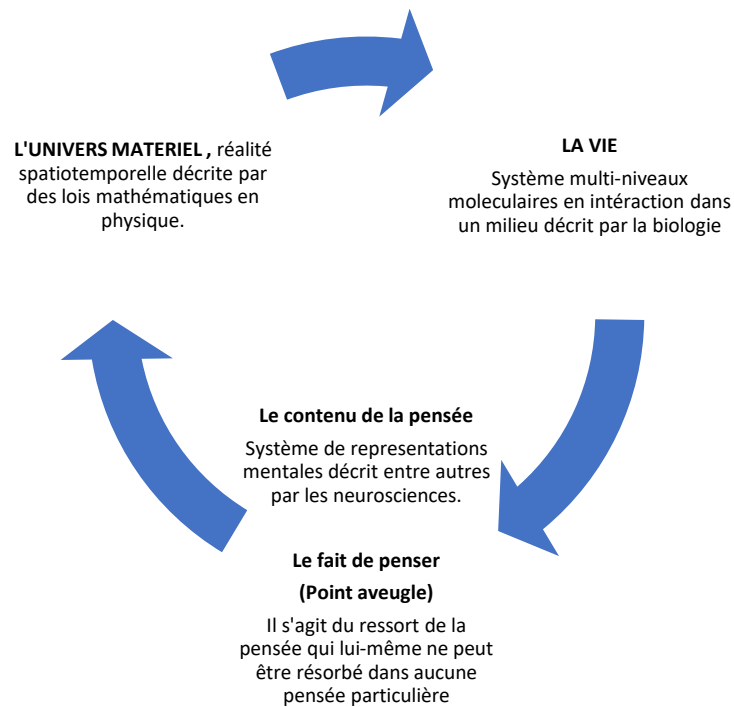
La pensée totalisante en science conduit au réductionnisme, choisissant une seule discipline, ou bien une seule méthode, comme fondement radical et unificateur de la diversité des réalités. On pourrait donner des exemples d'une telle pensée en évoquant le réductionnisme mathématique ou le physicalisme de certains néo-positivistes. Par ailleurs, cette pensée conduit à occulter certains traits importants du vécu humain, comme l'intuition, l'étonnement, l'émerveillement, la créativité, le monde des émotions, des ressentis et des sentiments. De même, cette pensée conduit à occulter l'esprit d'une personne qui comporte un ensemble de représentations justement construites en fonction de ce vécu et de ses aspirations. En revanche, une pensée qui refuserait les acquis des sciences en ne faisant droit qu'aux dimensions subjectives du vécu se transforme vite en idéologie également réductrice.

A l'opposé de ces deux positions, nous avons tenté de décrire une philosophie nuancée qui articule sans les confondre la diversité des sciences en montrant leur filiation et leur spécificité. L'idéal sous-jacent est donc celui du respect de la diversité observable décrit par une diversité de disciplines, qui interagissent mais qui ont chacune un objet propre de recherche. Ces domaines scientifiques sont signifiés en fonction de réalités naturelles particulières (matérielle, biologique, cognitive) pour les sciences exactes et des rapports entre les individus dans les sociétés et avec leur environnement, pour les sciences humaines et sociales. Or, ces réalités sont

soumises à des lois propres de combinaisons et d'évolution ou à des modes évolutifs qui ne tombent pas nécessairement sous la coupe d'une loi (c'est le cas des phénomènes « impréconcevables » à la Kauffman). L'histoire humaine n'est pas écrite à l'avance et les contours échappent à une théorisation totalisante et a priori.

Cette description épistémologique conduit à une interprétation ontologique. Au fond, notre position se rapproche de celle d'Aristote pour qui la description d'un monde empirique ne se résorbe pas dans un et un seul principe, ou un et un seul type d'entité élémentaire, mais se déploie en une « ontologie pluraliste » fondée sur une diversité de substances irréductibles entre elles, mais unifiées tout de même, par le fait qu'elles renvoient toutes à une articulation de matière et de forme (hylémorphisme). Mais, nous nous distinguons du Stagirite, dans la mesure où, suivant les sciences contemporaines, nous considérons les substances comme des réalités émergeant à partir de constituants spécifiques (élémentaires) soumis à des combinaisons et des évolutions propres. Ces substances justifiant alors des approches de disciplines en partie irréductibles, mais qu'il est néanmoins possible d'articuler logiquement. Comme il est possible de trouver une unité dans l'ontologie pluraliste d'Aristote en se fondant sur l'idée de forme des substances, les mathématiques et l'informatique permettent davantage à présent d'usiter la notion de combinatoire.

Ainsi, d'un point de vue épistémologique, nous avons analysé les convergences entre les sciences et leurs éléments de divergence qui justifient leur spécificité, (objet de recherche, méthode d'observation ou de conceptualisation, méthode de justification). D'un point de vue, ontologique, il est possible de schématiser notre réflexion autour de trois fondements : l'univers matériel, la vie, la pensée.



- (1) La description de l'univers est permise par la détermination des concepts d'espace, de temps, matière et de leur rapport.
- (2) La description de la vie est permise par la détermination de composants, les macromolécules, et des fonctions émergeant de ces biomolécules.
- (3) La description de la pensée est permise par la détermination de connexions cérébrales par les neurones, et des représentations mentales relatives au vécu d'un individu avec d'autres.

Enfin, on a trop accredité à partir des réussites indéniables des sciences empirico-formelles contemporaines, l'idée qu'une unification des savoirs pourrait se fonder sur une seule discipline (la physique par exemple) ou sur un seul type d'entité (une ontologie particulière). Or, si l'on entre dans une description détaillée des sciences, on découvre qu'une telle idée est loin d'être réalisée.

De plus, la raison critique ne peut :

- (1) Trouver un argument probant qui éliminerait totalement la possibilité d'une ontologie pluraliste. En effet, on peut justifier l'existence d'une pluralité irréductible de réalités

élémentaires. Par exemple, les êtres vivants sont composés de matière, mais la réalité des êtres vivants ne s'épuise pas dans une description seulement physique de ses composants matériels ; la physique ne pouvant pas donner comme telle de sens *a priori* aux fonctions biologiques qui apparaissent dans le « bricolage évolutif », comme l'a bien montré Kauffman) ;

- (2) Cette raison critique ne peut pas non plus logiquement trouver son fondement ultime dans des descriptions empirico-formelles si puissantes soient-elles, car c'est bien cette raison qui est la condition nécessaire fondatrice de cette science (puisque la raison fonctionne à partir de signes et de représentations abstraites). C'est ce que nous nommons « le point aveugle de la pensée ». ⁶²

Lorsque Blondel analyse les sources de l'action, lorsqu'Eddington s'interroge sur les fondements de la science en disant la science explique le monde mais qui explique la science » ? C'est à ce point qu'ils font référence. Eddington veut dire qu'il faut sortir de la seule cohérence interne des concepts des sciences pour expliquer les sciences en analysant, en particulier, la rationalité, l'activité cognitive, la notion même de concept et les modes de relations conceptuelles. Donc, effectivement, ce sont les philosophes qui expliquent la science, mais ceux-ci font appel à autre chose que les concepts scientifiques, à l'activité cognitive pour cela, au fait même de penser. Tous les individus ont leurs pensées, mais il y a quelque chose de commun chez toutes et tous qui leur permet de produire leurs pensées individuelles et c'est ce qu'on nomme ici « la » pensée, l'existence de cette faculté, le fait même de pouvoir penser. Kant dirait la pensée au sens transcendantal, c'est-à-dire dépassant les particularités de chacune et chacun. Alors, la clôture ultime des représentations dans la pensée n'est pas concevable car elle devrait résorber dans la pensée ce qui la rend possible. Ceci n'entame nullement les capacités et l'efficacité de la raison pensante. Ceci signifie seulement le refus de représenter ce qui n'est pas du domaine de la représentation, mais de la métacognition⁶³.

⁶² A propos de l'idée de point aveugle, nous renvoyons à Jean-Yves Girard « Le Point Aveugle: Tome 1. Cours de Logique, Vers la perfection », 2006, et « Le point aveugle. Cours de logique, Volume 2 », 2007, livres parus chez Hermann, collection quai des sciences.

⁶³ A ce propos, nous renvoyons en particulier à l'ouvrage de Olivier Houdé, *Comment raisonne notre cerveau*, Que sais-je, 2019, où il est question du mécanisme des facultés cognitives, mais aussi de l'irrationalité.

Conclusion générale de la thèse.

De la diversité des savoirs à la diversité des finalités : **la diversité des possibilités humaines, dont celle de se représenter le monde.**

Cette conclusion est construite en deux parties. Dans un premier temps, la première partie de cette conclusion permet d'identifier la cohérence de chaque partie (sous-ensemble). En partant d'une unité, par exemple, le recours au formalisme dans les sciences exactes, on en vient à la diversité des sciences formelles et empirico-formelles, en prenant compte les modèles descriptifs, explicatifs et justificatifs, conduisant à une diversité de formalismes. Dans un second temps, la seconde partie de cette conclusion permet de synthétiser la cohérence globale de l'ensemble de ces parties (diversité des formalismes, diversité des processus naturels, diversités des ordres de réalité (naturelle/humaine)), montrant qu'une théorie véritablement ultime paraît rationnellement impensable.

Tout d'abord, rappelons donc l'évolution interne de chaque partie. En introduction, nous avons rappelé que la démarche scientifique est avant tout une posture intellectuelle, un état d'esprit critique, qui doute et cherche des éléments justificatifs. Dans la première partie, nous avons décliné une somme de domaines scientifiques (sciences formelles, empirico-formelles, herméneutiques) en fonction de leur méthode descriptive, explicative et justificative. Dans la seconde partie de cette thèse, nous avons mentionné une diversité de niveaux de complexité et une part d'imprévisibilité dans l'évolution des connaissances, tant au niveau phénoménal qu'en fonction de l'évolution conceptuelle et technique, qui n'est pas anticipable. A la suite de la description des méthodes de justification, différentes selon le modèle formel ou empirico-formel, nous avons mis en lumière une diversité d'objectivités, puis une diversité de subjectivités, en fonction du monde intérieur relatif aux représentations mentales. Nous avons donc inclus aux sciences empirico-formelles, les sciences humaines.

Cependant, même s'il semble possible d'établir une filiation entre la diversité des disciplines scientifiques, cette diversité est irréductible et non unifiable. Le seul principe vraiment

unificateur est le principe général de la raison critique, qui permet de faire progresser toutes connaissances. Elle ne peut donc pas décrire les cultures et l'évolution des sociétés, par exemple. Ainsi, cette thèse a tenté de montrer que les sciences exactes ne suffisent pas à décrire tous les champs de la connaissance, en particulier, toute la connaissance anthropologique.

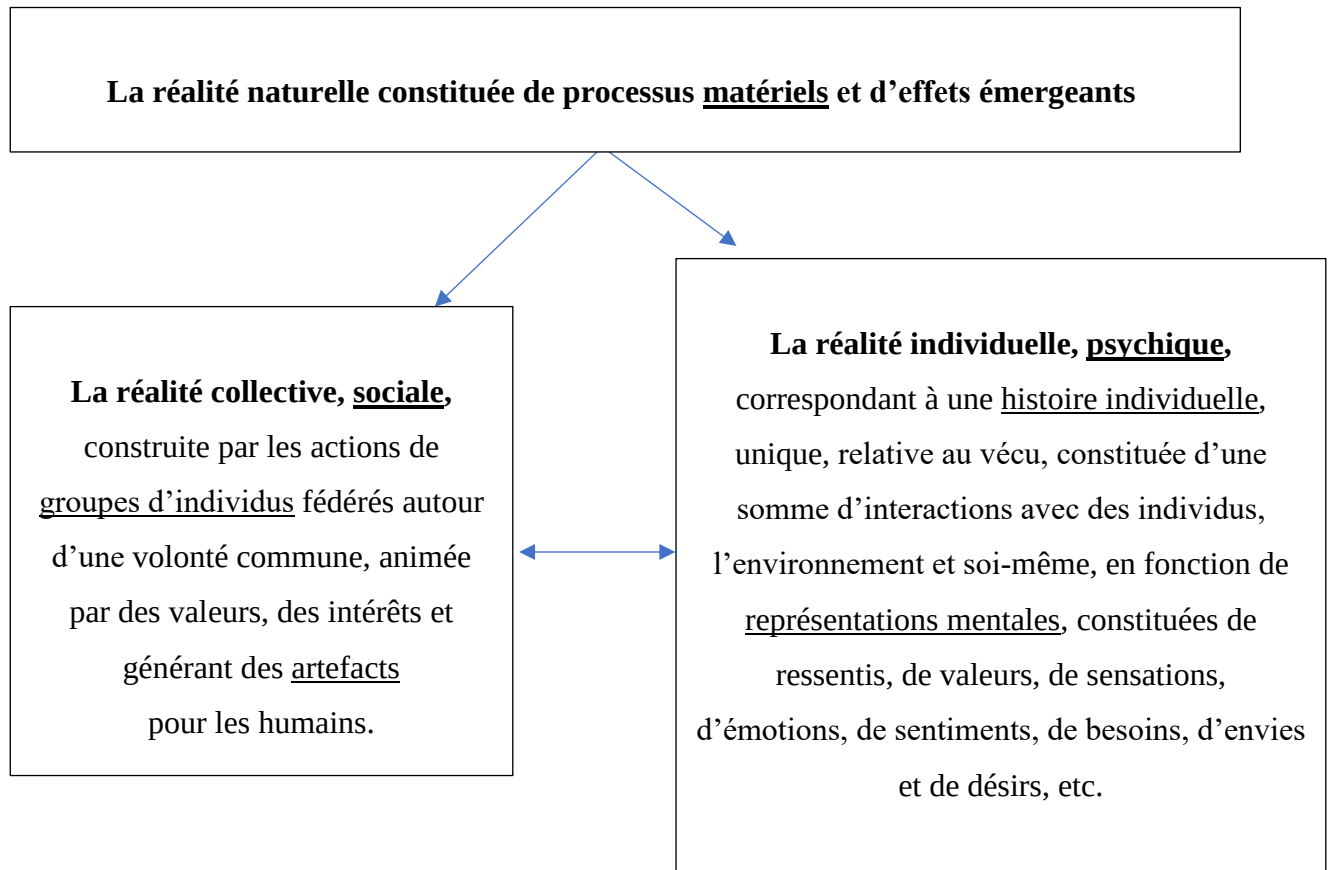
De plus, le projet unificateur (celui qui anime des chercheurs d'une « finale theory », théorie finale ou d'une « theory of everything », théorie du tout) aussi stimulant soit-il (et il l'est !) occulte systématiquement le fait qu'une approche scientifique repose sur une pensée qui est, comme nous l'avons vu, sa condition de possibilité. La science ne peut fonder la condition qui lui donne de pouvoir exister. Il y a d'ailleurs une obstruction logique qui empêche déjà les mathématiques se s'auto-fonder. En outre, on l'a vu en étudiant la critique blondélienne, la science trouve son ressort, son origine, au cœur de l'action humaine, dont le ressort constitue l'un des aspects de la « tâche aveugle », dont nous avons parlé ci-dessus, et qui se caractérise par une « pensée pensante », dynamique, (l'activité cognitive) qui ne se réduit pas à une « pensée pensée », résultat de cette dynamique (somme de représentations émergentes). En effet, la « pensée pensante » est la source de l'activité de pensée, la « pensée pensée », ce sont les effets ou les produits de cette source de pensée qu'est la pensée pensante. Il y a la source de la pensée mathématique (pensée pensante) et les produits de cette pensée (les théorèmes, les concepts qui sont dans les livres...). La « tâche aveugle » traduit que pour penser la pensée, il faut y penser, et cette source de pensée, qui permet de penser la pensée, ne peut être décrite (car en la décrivant il faut faire appel à une pensée...). Il nous a donc semblé logiquement nécessaire, dans une troisième partie, d'observer cette réalité humaine, tant psychique que sociale.

Par une double approche, philosophique et sociologique, il nous a été possible de questionner les fondements et les finalités de la connaissance. D'une part, il y a un vécu humain profond, une volonté, qui précède toutes les réalisations humaines. Les sciences trouvent leur tremplin dans cette volonté. D'autre part, en creusant profondément pour réfléchir sur ce qu'est cette volonté, et les sources de l'action, on se rend compte que l'on doit sortir du champ des sciences exactes, sans d'ailleurs les renier, et entrer dans le champ de la subjectivité. Cette subjectivité fait tendre un philosophe, selon son histoire de vie et ce qui lui paraît le plus crédible, vers un positionnement philosophique. Or, il existe, aussi, une diversité de système philosophique, justement relatif au choix de fondements, tout comme l'axiome en mathématique, que l'on croit vrai, en fonction d'un principe arbitraire, ou plusieurs. Le nôtre fût de tenté d'expliquer qu'une explication scientifique de la réalité naturelle ne suffit pas à épuiser la description du réel. Il s'agit d'inclure la réalité humaine, tant individuelle, en fonction de l'activité psychique, que société, en fonction des règles du vivre ensemble. Mais, même ces inclusions ne suffisent pas

à épuiser le réel, car la réalité humaine évolue en fonction des connaissances, des techniques et des instruments a priori impréconcevable, comme la vie évolue, elle aussi, en fonction de conditions indéterminables. De plus, une description de la vie ne suffit pas pour épuiser ce qu'est la vie. Il faut contempler, sentir et ressentir, pour comprendre ce que signifie être vivant.

Notre thèse rejoint donc deux éléments essentiels de deux traditions philosophiques occultés par la dominance du platonisme ou des monismes scientifiques contemporains. D'une part, le pluralisme ontologique d'inspiration aristotélicienne, refusant au nom de la raison de souscrire à la nécessité d'un monisme ontologique (qui peut être postulé, mais qui n'est pas justifié), pour concevoir la réalité naturelle. D'autre part, la diversité des ordres de réalité (réalité naturelle et réalité humaine), fondée sur l'analyse de la philosophie, comme celle qui ressort de *L'Action* de Blondel qui refuse de s'en tenir exclusivement aux sciences empirico-formelles. Ce refus est fondé sur le fait que les sciences empirico-formelles ne trouvent pas en elles le ressent qui les anime et les fondent. En effet, on doit alors ajouter la connaissance apportée par les sciences humaines, et plus profondément, par une anthropologie permettant d'aborder la réalité humaine. En outre, en plus de la réalité naturelle, de la réalité humaine, il faut distinguer dans la réalité humaine l'individuel et le collectif, les individus et les sociétés. Mais, cette association d'un ensemble de connaissances produites par cette diversité des sciences ne suffirait pas encore à épuiser le réel, car elle ne pourrait pas inclure la somme des représentations mentales (sensorielles ou conceptuelles) et de leurs relations, liées à l'histoire personnelle de chaque individu, constituée de la vie intérieure, de réflexions internes, et externes, d'actions et de pensées partagées, en somme, son ipséité, c'est-à-dire ce qui fait que chaque être vivant, est un être unique.

Une diversité ontologique fondée sur une distinction d'ordres de réalité



Globalement, cette thèse avait donc plusieurs objectifs. Nous allons les reprendre en sept points et approfondir le dernier afin de conclure sur ces autres manières de penser le tout, de façon non-réductionniste.

1) Une diversité de savoirs

Cette thèse s'est focalisée sur la recherche d'arguments justifiant le fait que l'approche de la réalité nécessite une diversité irréductible de disciplines, et cette approche ne peut être conçue à partir de l'idée qu'il existerait une théorie ultime, une « théorie du tout » (dans la ligne de ce que pensent certains physiciens à propos d'une « théorie unitaire »). Nous avons donc montré, dans un premier temps (première et deuxième partie), la diversité des sciences exactes (formelles et empirico-formelles). Nous avons conclu qu'il existe une diversité disciplinaire

irréductible. De plus, l'apport des relations entre cette variété de disciplines en fait émerger de nouvelles. Dans la troisième et dernière partie, nous sommes passés de la diversité des savoirs à leur articulation en fonction de fondements philosophiques.

2) Une diversité de raisons individuelles et collectives de pratiquer une discipline scientifique.

Nous avons alors abordé cette finalité à travers le sens de l'action, par la pratique scientifique⁶⁴. Si la diversité des approches du réel s'est révélée au travers de nos arguments comme irréductible, on pourrait en conclure, de manière prématurée, qu'il n'existe au fond aucune unité du savoir. Cependant, la quête de l'unité est un fait et un fait constant dans l'histoire des sciences surtout récentes. Cette quête doit, alors, être à son tour interrogée, même si elle ne parvient pas, pour des raisons de principe, à se construire à l'intérieur d'une discipline particulière (la physique par exemple). La quête d'unité renvoie justement à la question de la finalité profonde qui anime la connaissance. Comme le disait Blondel, la volonté « voulante » qui anime l'activité scientifique ne se résorbe jamais dans les réalisations partielles de la volonté « voulue » ici-et-maintenant (de la réalisation de telle ou telle discipline, de telle ou telle expérience, théorie, ...) Les volontés voulantes sont antérieures aux volontés voulues. Les premières sont « créatrices du projet », comme l'explique une thèse publiée sur le site de l'université de Lyon, alors que les secondes sont « formulation du projet ». La volonté voulante est « initiale et irréfléchie et se traduirait par une inclination », en somme elle correspond au désir. La volonté voulue correspond à la stratégie de l'action mise en œuvre pour réaliser ce désir. Ainsi, cette distinction blondélienne est utile pour conclure notre thèse, car elle met en lumière la différence entre le désir de connaître, les moyens mis en œuvre pour connaître, les conséquences de l'acquisition de connaissances et les moyens (humains et techniques) de rediriger la recherche scientifique en intégrant la connaissance de l'impact scientifique en fonction d'une volonté collective et d'un projet de société.

3) Une diversité disciplinaire.

Par ailleurs, la science n'est ni un dogme, ni une idéologie, puisque par définition, comme nous l'avons vu en introduction avec Jean Ladrière, elle est d'abord et avant tout critique. De plus, la science est pratique. Elle doit prouver ce qu'elle affirme par l'action, soit par une capacité de reproduire un ordre de phénomènes (modélisation, simulation), soit par une capacité à réaliser

⁶⁴ Confer l'annexe sur les précisions terminologiques.

des prédictions. En outre, la science se manifeste par une diversité concrète de disciplines scientifiques, en fonction d'un objet de recherche, et chaque discipline possède sa propre nomenclature. Toutefois, la différence de nomenclature n'est pas vraiment ce qui diversifie les sciences, car on pourrait songer à une traduction parfaite par laquelle les termes d'une discipline se retraduirait dans l'autre : par exemple en chimie "liaison entre atomes" deviendrait "partage d'électrons décrit par la mécanique quantique". La différence de nomenclature est un fait, mais elle n'est pas nécessairement un facteur de distinction radicale entre les disciplines. Ainsi, la diversité des disciplines se traduit par une sorte « d'incommensurabilité des paradigmes » tel que l'envisageait Thomas Kuhn dans *La structure des révolutions scientifiques*. Le langage d'une discipline n'est pas nécessairement traductible dans le langage d'une autre. Entre l'organisme humain vu par les biologistes et la personne humaine, auquel fait référence le Droit en l'opposant aux « choses », la relation n'est pas celle d'une traduction pure et simple. Ces concepts possèdent des relations, mais appartiennent à des champs de connaissances irréductibles.

4) Une diversité de manières de prouver l'objectivité selon le modèle explicatif et justificatif.

En plus de la question de la traduction des savoirs, nous avons vu qu'il existait plusieurs manières d'apporter des preuves de ce qui est affirmé. Il existe diverses manières de prouver l'objectivité.

Soit par une logique prenant appui sur des axiomes pour engendrer des démonstrations au cœur d'un formalisme. (C'est le cas de la logique formelle ou des mathématiques voire de la physique théorique axiomatisée.).

Soit par une expérimentation s'enracinant dans la correspondance entre un ordre de phénomènes et une théorie. (C'est le cas des sciences empirico-formelles comme la physique, la chimie, la biologie).

Soit par une contextualisation en fonction d'un référentiel de temps, une ère, sur une période arbitraire en fonction d'un début, origine, et d'une fin, qui restitue ce qui est affirmé sur le fond d'évolutions, de tendances, en fonction d'un principe et d'un devenir. Mentionnons à ce propos l'ouvrage *Ontologie du devenir* qui décrit justement une diversité de types d'évolution selon les disciplines scientifiques. (C'est le cas de toutes les sciences impliquant une historicité

(cosmologie, biologie évolutive, histoire, ...) Or, ces modèles descriptifs, explicatifs et justificatifs sont foncièrement différents.

5) Une réalité naturelle et une réalité émergente de l'activité humaine, artefactuelle.

De même, nous avons décrit deux ordres de réalité, dont les fonctionnements sont totalement différents : la réalité naturelle et la réalité humaine, même si la seconde émerge de la première. Avec l'apparition du vivant, de nouveaux effets émergent, en particulier des processus sociaux et de nouvelles facultés, dont celle de conceptualisation, qui conduit à inventer de nouvelles techniques et technologies. Ces processus, qui ne sont pas naturels, mais artificiels, inventés par l'humain, sont l'objet des sciences humaines et sociales (SHS) et aussi de la philosophie. Cette dernière peut être un pont entre les sciences exactes et les SHS car elle peut interroger le fondement d'une discipline scientifique, les pratiques, méthodes, preuves et usages des sciences, ce que nous avons fait. Il n'est donc pas possible de nier cette diversité pratique de la science, qui engendre une diversité de savoirs.

6) Une diversité d'approches : scientifique ou philosophique.

Enfin, l'articulation de tous les savoirs en une totalité ne serait pas scientifique, mais est proprement philosophique, et construite autour d'un principe ou d'un « horizon ». L'irréductibilité des disciplines et leur impossible unification, sur le plan scientifique, ne signifierait donc pas que l'on ne pourrait pas penser une unité, mais il conviendrait de le penser en philosophie. En science, cette unité serait un idéal, une sorte d'horizon, d'idée régulatrice, un peu "comme si" la pensée et l'action étaient polarisées par une fin, qui justifierait cette tension vers une unité que l'ordre des phénomènes et des théories ne pourraient leur procurer entièrement. C'est un peu le paradoxe stimulant de la science que de se laisser mouvoir par une quête d'unité qu'elle ne peut posséder. Toutefois, en abandonnant la prétention de ne pas posséder une fois pour toute, en son sein, une théorie ultime de la connaissance, la science évite ainsi son asphyxie, car c'est bien de cet « horizon » à jamais inatteignable qu'elle reçoit l'origine profonde de sa dynamique épistémique. La science ne perd rien à ne pas atteindre une unité ultime, qui en réalité ne le serait que très partiellement, mais elle a tout à gagner à se laisser guider par sa quête.

Mais la quête de la science n'est pas forcément qu'un désir de connaissance ultime, ou d'articulations de la diversité des savoirs. Les idéaux scientifiques sont variés. La finalité (but) de la science est aussi relative à l'agent qui la conçoit et la met en œuvre. Individuellement, la

science permet de comprendre des processus du réel, tant matériels que psychiques et sociaux. Elle permet de se situer dans l'espace et le temps en fonction de plusieurs histoires cosmologique, géologique, biologique, civilisationnelle. Elle permet aussi de situer les limites de la connaissance à une époque et des perspectives possibles d'évolution, d'établir des prospectives. Mais l'activité rationnelle de la science sans l'imagination manquerait de créativité!

Les idéaux qui meuvent les scientifiques donnent l'élan de la science, la direction. Cet élan est augmenté par la dimension collective de la science, la pratique de la coopération internationale et de l'intelligence collective. La science permet de mutualiser tous les possibles humains autour de causes, mues par des volontés, animées par des valeurs, des désirs le désir étant l'essence de l'humain (pour paraphraser Spinoza), tel le désir de savoir, savoir pour savoir, car la curiosité intellectuelle habite l'humain, debout, pour voir, pour savoir, pour comprendre, en quête de découvertes, de nouveaux horizons, d'innovation (quitte à prendre des risques), en quête d'émerveillement. Ainsi, la science, comme la vie, est une aventure, dont on ne connaît pas le devenir.

7) La diversité des positions philosophiques pour construire un système philosophique.

A présent, dans cette seconde partie de la conclusion générale, après avoir synthétisé dans la première l'apport de chaque partie, nous allons résumer les éléments de cohérence entre ces parties en explicitant plusieurs arguments émergents visant à expliquer que le concept d'une totalisation complète des connaissances n'est pas ultimement défendable d'un point de vue scientifique. Tout d'abord, nous avons décrit la diversité des connaissances en fonction de leur méthode de construction soit formelles, soit empirico-formelles, soit contextuelles. Ensuite, nous avons mentionné la diversité des modes de justification de ces connaissances par une logique formelle, une validation empirique ou par une explication multifactorielle. Les trois solutions possibles pour la réalisation d'une totalisation sont donc de nature formelle, empirico-formelle ou multifactorielle.

(1) Premièrement, nous avons évoqué la totalisation par la construction d'un formalisme. Ce qui nous a permis d'en souligner précisément ses limites, en particulier par le fait que le formalisme ne peut expliciter en son sein les conditions de sa propre mise en œuvre. Le formalisme ne peut s'auto-fonder et, s'il cherche à le faire, il se heurte à des obstructions internes, des limites internes (comme l'incomplétude, l'indécidabilité, ...) mises en évidence par Gödel, Church, Turing et interprétées par Jean Ladrière et Nagel. Cette explicitation est en

autre, pour une part, l'objet de la philosophie, car il s'agit bien ici de remonter aux fondements de la pensée elle-même.

(2) Deuxièmement, nous avons envisagé la solution d'une totalisation par une construction empirique renvoyant à une réalité élémentaire, une « élémentarité ». Un exemple en est donné par le réductionnisme, voulant rapporter la totalité phénoménale à la physique. Nous avons mentionné les limites d'une telle conception. Reprenons-les brièvement.

La première limite est le fait que la réduction visée ici ne serait pas scientifique, mais véritablement philosophique (épistémologique), puisqu'elle correspond à un choix arbitraire de présupposés relatifs au fondement, à savoir : la référence aux lois de symétrie et à leur brisure. En outre, cela pose deux nouveaux problèmes. Tout d'abord, ce choix pose question quant à la place des autres sciences. Cela donnerait une primauté à la physique théorique et poserait la question de la démarcation et de l'autonomie relative des autres disciplines. Nous avons alors abordé la question de la définition du caractère propre des disciplines et nous avons souligné que la discipline se détermine à partir d'un objet de recherche qu'elle construit.

Dès lors, il existe une diversité d'objets de recherche et une possibilité d'interaction disciplinaire. Une nouvelle question se pose donc, qui est celle de leur articulation, alors même que chacune possède une notion d'élémentarité différente. De plus, à travers l'émergence de nouvelles disciplines, avec l'évolution des connaissances par les évolutions conceptuelles et instrumentales, nous comprenons que la totalité des connaissances est difficilement résorbables en une seule, puisque les connaissances ne cessent d'augmenter et de se diversifier. A partir de ce constat, nous remarquons donc que l'unification ne tient pas compte en général d'un aspect historique. Pourtant, les connaissances ne nous sont jamais disponibles comme telle en une totalité définitivement acquise, et une unification ne peut se concevoir que comme un état possible et temporaire de mise en cohérence d'un champ partiel de connaissances, toujours ouvert et en continuel développement...Le caractère ouvert et historique des connaissances empêche sa clôture en un cadre fixe qui pourrait être décrit par une représentation complète, cohérente et ultime.

Ensuite, et c'est la deuxième limite, nous avons vu, comme l'explique aussi Anderson dans l'article *More is Different*, qu'exprimer la totalité autour d'un fondement nomologique (la donnée de « lois ») ne permet pas d'intégrer tous les phénomènes de l'univers, et reste posée la question du fondement des lois. En effet, nous avons vu qu'exprimer la totalité en termes de symétries et de leurs brisures ne permet pas d'exprimer tous les processus naturels. Dans les

systèmes complexes, nous ne pouvons pas toujours identifier, de manière générale, des invariants liés à des symétries. En outre, certaines caractéristiques des systèmes complexes, comme celles de « fonction » (au sens du biologiste), ne peuvent être facilement définissables par des concepts physiques (c'est un apport important de Stuart Kauffman à notre propos.) Le problème est alors déplacé à l'articulation entre le simple et les niveaux de complexité. Mais, tout n'est pas prévisible et donc concevable (c'est le second apport important de Stuart Kauffman à notre propos).

Cependant, une unification de la science permettant de penser, à partir des lois physiques, l'émergence du monde et la source de son existence est l'idéal ontologique de nombreux scientifiques. Par exemple, Atkins décrit cet idéal dans l'ouvrage *Les grandes lois de l'univers: les origines des lois de la nature*. Mais cet idéal est-il cohérent d'un point de vue épistémologique ? Tout d'abord, il ne considère qu'un seul modèle explicatif, celui de la physique théorique. Il ne considère donc pas tout ce qui la rend possible et la constitue effectivement (l'ensemble des processus naturels, la cognition, les choix de la communauté scientifique, de la société). En admettant qu'il s'agisse d'en faire la totalité explicative, il s'agirait de penser ce qui est "méta-physique" à partir de la physique pour réduire le tout à cette globalisation. Il est dès lors nécessaire de faire appel à une véritable philosophie de la physique, et non plus seulement à la physique.

Mais, d'une part, en la mettant en rapport avec la philosophie des autres sciences. En la confrontant avec la philosophie de la biologie, par exemple, nous observons que la philosophie de la physique ne répond pas à toutes les questions. Elle n'est donc pas ultimement unificatrice. D'autre part, si nous abordons la philosophie des sciences, en général, nous fixons notre attention sur les méthodes et non plus sur les questions spécifiques relatives aux domaines. Pour vérifier cette diversité de questionnements, nous renvoyons à l'ouvrage *Précis de philosophie des sciences* constitué de réflexions sur les problèmes spécifiques de chaque discipline et sur les méthodes scientifiques en général. Une théorie vraiment ultime répondrait à la fois à toutes ces questions méthodologiques, générales, et disciplinaires, particulières. Elle articulerait, à la fois, la diversité des méthodes et les spécificités des disciplines. Mais notre analyse suggère que cela n'est pas possible. Alors, il semble plus fécond de résister à la réduction à un cadre unique pour valoriser l'idée d'une articulation des domaines, des méthodes... Une telle articulation philosophique interdisciplinaire pourrait être possible à la manière de ce que fait Michel Bitbol dans *Théorie quantique et sciences humaines*, grâce à des parallèles conceptuels et méthodologiques.

Tout d'abord, ce philosophe et physicien fait état des limites du réductionnisme en citant l'analyse de John Searle :

« (...) nous vivons dans un monde entièrement fait de particules physiques dans des champs de forces. Quelques-unes d'entre-elles sont organisées en systèmes. (...) A présent, la question est la suivante : comment peut-on rendre raison des faits sociaux à partir de cette ontologie ? » (Bitbol 2009). Puis, il ajoute que cette « démarche philosophique peut nous conduire à identifier un rapport plus profond entre les deux familles de sciences. » Il précise qu'il s'agit d'ailleurs de la position de Bas Van Fraassen dans *The Empirical Stance*, et qu'elle privilégie les méthodes scientifiques aux contenus. (Bitbol 2009). Elle est donc épistémologique et non ontologique. On retrouve ici une intuition de Von Bertalanffy dans sa *théorie générale des systèmes* qui cherchait non à réduire les niveaux, ou les domaines, mais à les relier par des isomorphismes entre les structures communes.

Aussi, la réflexion que nous avons menée montre qu'il ne faut pas confondre la question de l'unification de la physique, qui est du registre de l'évolution des connaissances dans une discipline, la physique théorique, et celle de la réduction de l'ensemble des connaissances à une discipline. Ce n'est pas parce que l'on aurait réussi à unifier la relativité générale et la mécanique quantique en un formalisme unitaire que la question de l'unification des connaissances serait réglée ! L'unification des connaissances est une question épistémologique beaucoup plus profonde. Par exemple, la question de l'origine possiblement "méta-physique" du monde (la source de l'être) n'en serait pas pour autant résolue, car la « loi des lois » n'inclurait pas son fondement. La question de la nature profonde, du fondement de la pensée et de la liberté humaines (et la démonstration de leur réduction à un substrat matériel, par exemple) ne serait pas non plus réglée. De plus, d'un point de vue logique, cet idéal se heurterait aussi à des limitations internes des langages formels interdisant une auto-fondation totale des langages scientifiques.

Par ailleurs, comme le montre le travail de Kauffman, même si tout se réduisait ultimement à la matière (une situation où l'on admettrait qu'il n'y a pas de transcendance métaphysique), il n'en resterait pas moins que la réduction de la biologie, de la psychologie, de la sociologie, de l'histoire, ... à une théorie unitaire de la physique serait non-pertinente en raison du fait qu'aucune loi générale, qu'aucun algorithme (déterministe ou probabiliste) ne peut mettre la main sur un champ de phénomènes dont on ne connaît pas l'espace de tous les possibles... Or, ce genre de considérations était d'ailleurs déjà en germe dans *La Nouvelle Alliance*, d'Ilya Prigogine et d'Isabelle Stengers, qui montraient, à partir de la thermodynamique des systèmes

loin de l'équilibre, l'impossible réduction de phénomènes complexes à un schéma « mécaniste » classique ; et ceci en raison du caractère « historique » des systèmes complexes, dont le devenir est lié à des fluctuations, qui ne peuvent être prédites a priori par aucune loi...

Dès lors, on voit se profiler, en contraste, avec l'idéal de réduction totale évoqué plus haut, une attitude épistémologique plus humble basée :

- a) D'une part, sur la distinction nette entre les questions métaphysiques touchant à la nature et à l'origine de l'être, de la pensée et de la liberté, qui relèvent clairement de la philosophie et celles qui approchent les existants, les capacités cognitives et volitives à partir des seules sciences empiriques et formelles.
- b) D'autre part, sur la démonstration de la pertinence d'une approche scientifique non-réductionniste basée sur une multiplicité d'ordres, dont les descriptions, engendrant diverses disciplines, présentent une autonomie relative.

Ainsi, il paraît nécessaire qu'une réflexion sur la physique (et sur l'idéal d'unification généralisée qu'elle suggère) ne mobilise pas seulement des compétences scientifiques (mathématiques, ...) mais aussi philosophiques, car on l'oublie trop souvent, et notre thèse voudrait mettre cela en évidence, cette réflexion ouvre nécessairement à une pensée des fondements de l'être, de la pensée, de la volonté et du désir. Et dans cette matière, comme le rappelle Maurice Blondel, la physique ne peut seule nous suffire car elle ne suffit pas à elle-même pour s'auto-fonder et fonder toutes les activités d'une pensée qui tente de décrire le tout!

Nous avons aussi envisagé une totalisation par l'articulation de systèmes complexes. Mais, nous avons vu que l'association d'une diversité de sous-systèmes liés par une diversité de contraintes ne permet pas non plus une totalisation. Les travaux de Kauffman montrent qu'il existe, dans les systèmes complexes, une part d'imprévisible et d'imprédictible. Leur devenir échappe, en partie, à une approche nomologique, algorithmique, calculatoire... Ainsi, la notion de système complexe permet de décrire une diversité (incomplète) de processus, des processus naturels et des processus artificiels (créés par l'humain). Nous avons donc mis en lumière le fait qu'il y a des ordres de réalité différents, la réalité naturelle et la réalité artificielle, qui émerge de l'activité humaine en fonction d'une diversité de processus. L'activité humaine est animée par des volontés parfois convergentes de collectifs, dans le cas d'intérêts communs. Et les types de collectifs dépendent de finalités variées, qui réfèrent parfois à des référentiels de valeurs. Or,

l'une des volontés collectives est celle de savoir et elle s'incarne par le savoir-faire. Nous avons donc approfondi la question de la volonté de savoir par les sciences, en relation aux techniques, soutenues par des projets de société, qui sont eux-mêmes conditionnés, en retour, par le développement de ces techniques et la question de leur financement selon les modèles économiques et politiques. Alors, une boucle de rétroaction (positive ou négative) techno-sciences-société entre ici en jeu.

Par ailleurs, d'un point de vue épistémologique, dans l'organisation des connaissances scientifiques, la différence entre la réalité naturelle et la réalité artificielle, créé par l'humain, se retrouve dans deux branches de la science : les sciences dites « exactes » et les sciences humaines sociales. Or, à l'intersection de ces deux branches, on retrouve les mathématiques, dont l'efficacité ou l'inefficacité (pensons à certains aspects de la psychologie, de la finance...) continuent à poser question et mériteraient une autre thèse. Cependant, la différence d'efficacité des mathématiques dans ces deux champs du savoir est peut-être aussi le signe d'une différence profonde en deux types d'approches du réel. Une analyse en profondeur de « l'inefficacité » de certaines mathématisations en sciences humaines, pourrait se révéler importante pour fonder l'irréductibilité des disciplines (pensons, ne fût-ce que comme exemple-limite, à l'inexistence d'une mathématisation *a priori* du devenir historique ou économique). Ceci devrait ouvrir à des recherches ultérieures. Disons simplement ici que s'il existait une théorie ultime du genre des physiciens, elle devrait être mathématique et efficace (prédictive, explicative, ...) Car c'est bien les caractéristiques des théories fécondes de la physique.

Enfin, dans son article *Less is Different*,⁶⁵ Butterfield développe deux idées importantes à propos de la notion d'émergence. Tout d'abord, l'émergence (apparition de propriétés nouvelles et robustes « au-dessus » de niveaux plus fins) n'est pas incompatible avec la réduction (entendue au sens où l'on peut déduire ce qui se passe au niveau supérieur à partir de ce qui se passe au niveau inférieur : « réduction = déduction »). Ce n'est pas contradictoire avec notre thèse qui affirme qu'il existe différents niveaux du réel ou de compréhension du réel (qui peuvent donner lieu à diverses disciplines). En outre, Butterfield explique que certaines émergences, l'existence de ces divers niveaux (ontologiques ou épistémologiques), peuvent être expliquées en partant d'un niveau inférieur et en procédant à un passage à la limite (le nombre N de degrés de liberté ou d'itérations d'un processus tendant vers l'infini). Ici, ces divers niveaux ont une existence propre et ils peuvent être déduits du niveau inférieur. L'émergence peut arriver avant le passage à la limite : N tendant vers l'infini. Des émergences peuvent donc se

⁶⁵ J. Butterfield, « Less is Different: Emergence and Reduction Reconciled », *Arxiv*, 3 juin 2011

produire dans des systèmes à un nombre fini de degré de liberté. Autrement dit, Butterfield montre que certaines émergences, à un certain niveau, sont explicables par une déduction à partir d'une physique à un niveau plus bas (mais il ne prétend pas que tout est réductible à la physique fondamentale, celle des particules élémentaires par exemple). On peut lui concéder facilement cela !

Cependant, certaines émergences ne peuvent faire l'objet d'un tel traitement. Par exemple, la non-réduction de la notion de « fonction biologique » à la physique, comme l'explique très clairement Kauffman, vient de l'impossibilité de baliser correctement l'espace de tous les possibles, interdisant donc la possibilité de construire une déduction, même probabiliste. Il faudrait pour cela préciser une mesure de probabilité sur un espace que l'on ne connaît pas et qui, par principe, n'est pas connaissable, à partir du substrat physique. Alors, par contraste, notre thèse, fait apparaître trois classes de phénomènes :

- 1) Ceux qui pourraient être totalement réduit (expliqués par) à un et un seul niveau fondamental.
- 2) Ceux qui, se passant au « niveau n », sont susceptibles d'être dérivés à partir d'une physique d'un « niveau inférieur n-1 ». Ceci est tout à fait défendable et c'est ce que montrent les exemples détaillés par Butterfield.
- 3) Ceux qui ne peuvent être expliqués uniquement par la physique, parce qu'on ne parvient pas à baliser (par calcul, par des lois, par des algorithmes) l'espace de tous les possibles (c'est ce que montre Kauffman). Pour reprendre son exemple, l'espace de tous les usages possibles d'un tournevis (pour maintenir une fenêtre ouverte ou pour ouvrir une boîte, donc tous les usages dérivés) n'est pas calculable par un algorithme ou exprimable par une quelconque mesure de probabilité, car ils ne sont pas tous concevables a priori puisqu'il existe une part d'incertitude et d'imprévisibilité. Dans le vivant, la pensée, la société, comme dans le bricolage, les usages et réutilisations possibles des « objets » ne sont pas prédictibles (car ils sont aussi liés à des environnements qui ne sont pas encore là et qui ouvriront un nombre incroyable de nouvelles possibilités « impréconcevables » !)

Il est donc intéressant de noter que plusieurs types de philosophies peuvent se construire sur une base autre que réductionniste. On peut citer, par exemple, la philosophie de Heisenberg sur la « connaissance humaine concrète ». Michel Bitbol synthétise sa pensée en trois régions. La

première région décrit tout *ce qui est séparable, décomposable*, le simple. La seconde région décrit ce qui n'est pas séparable, ce qui n'est plus quand on ôte un élément, un composant, le complexe. Cette seconde région traite donc de *ce qui est indissociable*, indivis. On obtient donc soit une description du simple, soit une description d'une forme de complexité. Cela correspond tout à fait à ce que nous avons décrit dans cette thèse : d'une part, des lois globales, d'autre part, l'émergence d'une diversité de systèmes complexes.

Enfin, la troisième région pensée par Heisenberg, est une région symbolique, qui ouvre sur la question de la signification. Nous sommes aussi arrivés à cette région en abordant la signification de l'individualité par son monde de représentations. Les symboles représentent ce qui a du sens pour l'individu à travers ses valeurs, son histoire, ce qui le touche dans sa singularité. Par exemple, une rose séchée ne sera pas qu'une rose séchée. Son sens sera relatif à son histoire en fonction de celle de la personne qui la conserve. Il y a donc une relation profonde entre objets et sujets, dans laquelle l'objet a une valeur qui dépasse de loin son utilité (qui pourrait être vue comme sa signification immédiate ; la différence entre « sens » et « signification » manifestant justement le fait que la valeur herméneutique de l'objet est plus riche que ses significations directes, utilitaires ou autres). Par exemple, un livre peut modifier la manière de penser d'un individu et donc le cours de son existence, ou même le cours de l'histoire collective. On peut penser aussi également aux rites funéraires. Il n'y a aucune utilité pratique aux funérailles, dans le sens où cela ne redonne pas vie aux défunts. Pourtant, cela a du sens pour des vivants de pouvoir réaliser un rite autour du corps mort d'un être cher. De plus, les rites sont des signes qui se réfèrent à une valeur (hypothétique) qui les transcendent, qui les dépassent en fonction des croyances. Cette région symbolique ouvre aussi sur le champ de l'intersubjectivité, par l'identification de représentations symboliques communes, d'archétypes. Ces trois régions, envisagées par Heisenberg, le simple caractérisé par une élémentarité, le complexe caractérisé par une fonction émergente, le symbolique relatif, à la signification, sont inarticulables. Elles conduisent à des descriptions différentes en fonction d'un modèle explicatif différent. Cela traduit donc ce qu'exprime justement Michel Bitbol « l'indissociabilité de la connaissance en général avec le genre de procédés qu'elle met en œuvre » (Bitbol 2009).

Ensuite, Michel Bitbol poursuit sur une analyse des manières d'exclure. En général, on peut considérer que l'inclusion d'un modèle explicatif est relative à la correspondance entre une question et une réponse. Par exemple, si je demande de quoi est composé une chose, j'attends une réponse qui me conduit au simple, à l'élémentarité. Au contraire, si je demande ce qu'il me faut pour arriver à un produit, j'attends qu'on me donne une recette (des composants et une

manière de faire). Enfin, si je demande pourquoi cela est fait ainsi, ou pourquoi il me faut faire comme cela, cela inclura la considération qu'il y a, en plus d'une élémentarité, d'une complexité et une finalité. Dans la troisième et dernière partie, nous avons donc réfléchi à la diversité de fondements et de finalités. La philosophie permet de parvenir à une représentation de la « totalité », par une proposition (à titre d'hypothèse) d'un fondement et d'une finalité de la connaissance. Mais cette totalité n'est possible qu'en fonction du choix d'un positionnement philosophique.

Ici, la position qui caractérise et motive notre réflexion est liée à une perceptive tout à la fois « réaliste » et « pragmatique », qui nous fait aboutir à l'épochè, la suspension de jugement et de la clôture épistémologique totale, face à la part d'imprévisibilité dans le réel. En fait, nous avons été conduits de cet idéal de clôture complète de la connaissance, enracinée dans le projet des théories unitaires de la physique, à la considération d'une multitude irréductible d'approches fondées sur la structure même des connaissances, mais aussi sur une diversité de choix philosophiques.

Aussi cette analyse nous a conduit à souligner que la connaissance s'enracine dans des contextes sociaux et des choix personnels. Et il importe, pour les comprendre, de remonter à la source et à la finalité de l'action humaine, qui n'est pas que scientifique. Il existe une diversité de manières de se représenter le monde en fonction de notre manière d'être au monde. Pensons à l'art, aux technosciences des ingénieurs, au numérique (*métavers* et *cyberespace* doublant l'espace physique !). De plus, ces manières d'être et d'agir dans le monde s'ajoutent à la réalité naturelle, des manières qui n'ont pas toujours-déjà été là ! Or, cet environnement, qui est généré par les choix en partie arbitraires des individus et des sociétés, ne peut donc faire l'objet d'une totalisation, d'une réduction à un principe unitaire, car il dépend d'une diversité irréductible de singularités individuelles et sociales. Il est multifactoriel. Ainsi, il est possible de passer de la diversité irréductible des ordres de réalité (naturelle et artificielle, liée aux activités humaines) à l'irréductible diversité d'individus, façonnant des mondes imprévisibles.

Alors, la non-totalisation de l'être phénoménal, que nous avons établi dans un premier temps, se double de la non-totalisation de l'action humaine, individuelle et sociale, et de ses créations. Le monde naturel, qui faisait l'objet d'une quête de totalisation, n'est qu'un monde particulier... Un autre est celui de l'artefact, de l'artificiel, un monde bien réel quoiqu'artificiel, comme l'atteste les effets physiques des cybermondes (par exemple, les piratages de systèmes bien réels à partir du réseau internet, la cyberguerre, les datas centers, ...). Ce monde est encore moins totalisable, car l'ensemble de ses possibles développements est lié à des choix toujours

singuliers, toujours particuliers, non-universalisables. La nature, autant que l'action, ont engendré des univers ouverts, en devenir, dont la seule unification possible pourrait s'envisager comme un « horizon » (réel ou fictif), comme une « idée régulatrice », donnant sens à une pensée d'un devenir, toujours ouvert, de la pensée et de l'action ...

Précisons, enfin qu'il ne faut pas confondre une irréductibilité épistémique et une irréductibilité métaphysique. La confusion mène à de lourdes conséquences. On pourrait dire que s'il existe des niveaux métaphysiquement transcendants, alors il existe des niveaux épistémiquement différents, mais l'inverse n'est pas vrai. Expliquons-nous.

Tout d'abord, il faut distinguer la construction épistémologique, de connaissances, de la construction ontologique, d'existants.

- 1) Une construction épistémologique, et non ontologique, est liée à une manière de diviser le réel dans la connaissance (nous choisissons de nous intéresser au vivant et non aux particules, par exemple). Il pourrait se faire que, métaphysiquement, il n'y ait qu'un seul niveau, mais c'est la méthode de connaissance (les "lunettes cognitives") qui distingue ces niveaux, qui ne sont pas absolus, mais seulement liés à notre point de vue et à nos choix, à « l'appréhension oblique de la nature », comme l'eût dit Giordano Bruno ! Il s'agit de la diversité de nos modèles explicatifs et justificatifs.
- 2) Une construction ontologique n'est pas seulement liée à la manière dont nous choisissons de regarder le réel, mais à la nature même du réel. Ontologiquement, métaphysiquement, il existe une diversité d'organisations. Le vivant est ontologiquement distinct du non-vivant ou d'une particule. Par exemple, une pierre ou une particule ne se comportent, effectivement, pas comme moi et je ne peux pas me comporter comme eux, car nous sommes deux réalités fondamentalement différentes en fonction de nos composants et agencements.

La question qui se pose alors est de savoir comment, et si, nous pouvons articuler 1) et 2).

Si on suppose une *diversité ontologique* (DO) => On peut donner sens à une *diversité épistémologique* (DE) : (DO) => (DE). Cela signifie que j'explique cette différence établie dans ma connaissance en partant de mon apriori : la diversité existe dans la réalité, objectivement et effectivement, donc elle est observable et descriptible.

Si on suppose qu'il n'y a pas de diversité ontologique, mais bien une unité ontologique (O) => On peut donner sens à une *unité épistémologique* (E) : (O) => (E), en choisissant un seul modèle explicatif. Je ne considère qu'un principe dans ma description épistémologique globale, par exemple, l'ordonnement du monde en termes de symétrie et brisure. Ainsi, je peux prétendre que tout émerge de cet ordre, y compris cet ordre lui-même. Alors, c'est mon apriori métaphysique. Ainsi, seule la compréhension des processus naturels globaux m'intéresse et la manière dont je parviens à ces connaissances, les fonctions cognitives, elles, ne m'intéressent pas. Je ne peux nier leur existence, mais ce sont pour moi des détails. De plus, je peux dire que leur description recourt à des concepts, donc au langage, et m'orienter vers une philosophie qui repousse les limites à celles du langage.

Par contre, s'il existe une *diversité épistémologique* (DE), cela ne veut pas dire qu'il existe une *diversité ontologique* (DO). Car la (DE) est liée seulement à des choix de points de vue, épistémologiques, à un modèle explicatif, et non à une division fondamentale dans l'être des choses. De même, s'il existe une unité épistémologique (E), cela ne veut pas dire qu'il existe une *unité ontologique* (O). La conception de l'unité, ou de la diversité ontologique, relève d'un choix philosophique et les deux positions sont défendables.

Les sciences ne nous donnent donc accès qu'à la dimension épistémologique, en fonction de modèles descriptifs, explicatifs et justificatifs. Ensuite, proposer une articulation des disciplines, ou de la diversité des savoirs, est une question philosophique. Il s'agit alors de penser à un niveau qui n'est plus celui des sciences empiriques et formelles, mais celui d'une manière de voir l'unité du monde et de l'être (une « Weltanschauung »), qui en retour pourrait motiver, en tant qu'idée régulatrice, les programmes unificateurs des mathématiques, de la physique, de la biologie. Mais, au contraire, nous pouvons aussi accepter une désarticulation du monde et décrire divers ordres.

Or, notre thèse s'achève, pour des raisons rationnelles, par l'abandon de l'illusion du « mythe » d'une théorie ultime conçue au seul niveau de la rationalité universelle, car l'unification tant recherchée dans l'histoire des sciences contemporaines ne pourrait finalement aboutir qu'en retrouvant une connaissance, une *épistêmê*, réconciliant une vision universelle abstraite, intemporelle, qui risquerait de passer à côté de la richesse d'une histoire « impréconcevable », inclusive d'une riche diversité d'évolutions de faits, le fait biologique, le fait social, le fait psychique. Mais, se séparer de cette illusion permet de comprendre le réel, cette diversité de faits, en s'intéressant à la diversité des disciplines scientifiques. Ainsi, le philosophe comprend qu'il est de passage dans cette mosaïque ontologique. Il prend conscience de son éphémérité

dans un univers éternel, qui n'a pas de raison d'être a priori, mais qui est tel qu'il est, tout simplement. Alors, le philosophe comprend et contemple le spectacle de ces métamorphoses, les métamorphoses dans l'univers et les métamorphoses dans sa pensée.

Puis, le philosophe comprend aussi que sa pensée, la pensée humaine pense la nature à partir de l'humain, d'un humain qui n'est jamais totalement compréhensible dans et par une représentation trop vite clôturée en une cohérence prétendument ultime, car comme le dit très bien Pascal « L'Homme passe infiniment l'Homme ». Ceci signifie deux choses : (1) évidemment pour Pascal, l'humain n'est pas réductible à ce que l'on en voit à ce que la science de son temps en dit (l'arrière fond d'une transcendance métaphysique occupe les pensées de Pascal), (2) de notre côté, nous l'entendons en un autre sens (complémentaire, mais qui n'implique pas le premier) : il n'y a jamais de borne à ce à quoi l'humain peut penser et imaginer. Quand on a pensé « le tout », on peut toujours ajouter une pensée à la pensée du tout ! Il y a donc une capacité potentiellement infinie (sans limite, apeiron) dans la pensée humaine, et cela se marque par l'intuition de l'infini en mathématiques, mais aussi en philosophie. Enfin, peut-être doit-on faire sienne la pensée de Jean-Paul Delahaye, qui au terme d'un très beau livre sur le rêve mathématique d'une théorie ultime disait :

« Oui, nous réussirons à penser des TOUT de plus en plus riches et colossaux, et nous pouvons en savoir beaucoup sur chacun d'eux, mais identifier quels sont ceux qui réellement nous donnerons la clef du TOUT véritable dans lequel nous nous débattons, reste aussi délicat et difficile qu'autrefois... » (Delahaye 2011).

Bibliographie

A

- AGHANIM Nabila, DOLE Hervé, « Les résultats cosmologiques de la mission Planck », Reflets de la Physique n° 64, consulté en ligne le 9/4/22
<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2020/01/refdp202064p4.pdf>
- AIT-DAOUD Sanaa, LAQUECHE Jean, BOURDON ISABELLE, « Écologie & Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) : une étude exploratoire sur les éco-TIC », Management & Avenir, 2010/9 (n° 39), p. 307-325. DOI : 10.3917/mav.039.0307. », Cairn, consulté le 9/4/22 <https://www.cairn.info/revue-management-et-avenir-2010-9-page-307.htm>
- ALDER Berni, JANCOVICI Bernard, « Statistique mécanique », Encyclopédie Universalis,
- ALLORI Valia, BACCIAGALUPPI Guido, BARBEROUSSE Anouk, LE BIHAN Soazig, *Précis de philosophie de la physique*, Paris, France, Vuibert, 2013.
- AMEISEN Jean-Claude, *La Sculpture du Vivant : le suicide cellulaire ou la mort créatrice*, Paris, France, Éd. du Seuil, 1999.
- AMIEL Jean, BRUSSET Henry, « Carbone », Encyclopédie Universalis, consulté le 9/4/22
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/carbone/>
- ANDERSON P.W, "More Is Different", Science, vol. 177, no 4047, coll. « American Association for the Advancement of Science », 4 août 1972, p. 393-396. JSTOR.
- ANDLER Daniel, *Logique, raisonnement et psychologie*, J. Dubucs & P. Lepage, dir., Méthodes logiques pour les sciences cognitives, Paris : Hermes, 1995, pp. 25-75.
- ANDLER, Daniel, dir., *Introduction aux sciences cognitives*, Paris, Gallimard, nouv. éd. 2004.
- ANDREWSKY Evelyne, Jean-Louis LE MOIGNE, Jean-Claude TABARY, Jean-Louis VULLIERME, Robert VALLEE, Bernadette BOUCHON-MEUNIER et Jean Blaise GRIZE, *Systémique et cognition*, Paris, France, Dunod, DL 1991.
- ANSES, « Les protéines Définition, rôle dans l'organisme, sources alimentaires », Anses-Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail », sur Anses, 07/0319 <https://www.anses.fr/fr/content/les-protéines>
- ARISTOTE, *Éthique à Nicomaque*, (trad et prés. R. Bödens), Paris, Flammarion.
- ARMENGAUD Eric, « Edelweiss-iii délivre ses premiers résultats à la recherche de la matière noire Légère », sur CEA, 28 octobre 2015, consulté en ligne le 9/4/22

http://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3658

ARMENGAUD Françoise, « Prédicats calcul des », Encyclopædia Universalis, consulté en ligne le 9/4/22 <https://www.universalis.fr/encyclopedia/calcul-des-predicats/>

ARMENGAUD Françoise, « Vérité valeur de », dans Encyclopédie Universalis, consulté en ligne le 9/4/22: <https://www.universalis.fr/encyclopedia/valeur-de-verite/>

ARMENGAUD Françoise, « Enthymème », dans Encyclopédie Universalis, consulté en ligne le 9/4/22 <https://www.universalis.fr/encyclopedia/enthymeme-rhetorique/>).

ARNOULD Jacques, *Sous le voile du cosmos : quand les scientifiques parlent de Dieu*, Paris, France, Albin Michel, 2015.

ARSONVAL Arsène d', *La Rotation de la terre démontrée par le pendule de Foucault*, Levallois-Perret, France, Ed. Cannevel, 1902.

ASLANGUL Claude, *Mécanique quantique : cours et exercices*, Louvain-la-Neuve Belgique, De Boeck supérieur, 2018.

ASPECT Alain, « Intrication quantique, le débat Bohr-Einstein tranché par l'expérience ». 25 octobre 2017 Pour la science N° 481, consulté en ligne le 9/4/22 <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/intrication-quantique-le-debat-bohr-einstein-tranche-par-l-experience-9921.php>

ASSADA Anne-Lise, « Une seule science ? », La Vie des idées , 15 février 2018. ISSN : 2105-3030. <https://lavedesidees.fr/Une-seule-science.html>

ASSOCIATION CSC, « Qu'est-ce que le cervelet ? Quel est son rôle ? », sur CSC,2022 <https://www.csc.asso.fr/article/connaitre/17/>

ATKINS Peter William, POUSSE André, *Les grandes lois de l'univers : les origines des lois de la nature*, Louvain-la-Neuve, Belgique, Deboeck supérieur, 2019.

ATLAN Henri, *Entre le cristal et la fumée. Essai sur l'organisation du vivant*, Seuil, 1979.

AUBENQUE Pierre, *Chapitre II. Être et langage*, Quadrige, 2013, p. 94-250.

AUDOUZE Jean, Lequeux James, « Univers », dans Encyclopédie Universalis, <https://www.universalis.fr/encyclopedia/univers/>).

AUDUREAU Eric, « Méthode axiomatique et négation chez Hilbert », Philosophia Scientiæ Travaux d'histoire et de philosophie des sciences, coll. Kimé 11/2/2007, mis en ligne le 30 juin 2011, consulté le 15 janvier 2021. DOI :<https://doi.org/10.4000/philosophiascientiae.335>

AUTHIER André, « Une découverte qui a changé le monde : la diffraction des rayons X » Reflets de la Physique n°39, consulté le 9/4/22 <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2014/02/refdp201439p24.pdf>).

B

BACCIAGALUPPI Guido, « Une solution par la physique ? La décohérence ».

dans LE BIHAN Soazig, *Précis de philosophie de la physique*, Vuibert, pp.53-75, 2013.

BÄCHTOLD Manuel, *L'interprétation de la mécanique quantique, une approche pragmatiste*, Hermann, 2009.

BÄCHTOLD Manuel, *The Possible, the Actual and the Event in Quantum Mechanics: A Pragmatist Approach*, thesis, Le serveur TEL (thèses-en-ligne), 2005.

BADIOU Alain, *Parménide: figure ontologique*, Véronique Pineau (éd.), Paris, France, Fayard, 2014.

BADIOU Alain, *Le fini et l'infini*, Montrouge, France, Bayard, 2010.

BADIOU Alain, *Court traité d'ontologie transitoire*, Paris, France, Ed. du Seuil, 1998.

BADIOU Alain, VODOZ Isabelle, *Écrire le multiple. Entretien, Genesis (Manuscrits Recherche-Invention)*, vol. 22, n° 1, 2003, p. 169-177.

BALIAN Roger, « La physique quantique à notre échelle », sur *Culture science*, http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/par_type_de_ressource/documents/balian2.pdf

BALIBAR Étienne, MACHEREY Pierre, « Formalisme », Encyclopædia Universalis, consulté le 9/4/22, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/formalisme/4-la-theorie-de-la-formalisation/>

BALIBAR Étienne, MACHEREY Pierre, « Dialectique », consulté le 9/4/22 <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/dialectique/>).

BALL Philip et Michel LE BELLAC, *Quantique: au-delà de l'étrange*, Les Ulis, France, EDP sciences, 2019.

BARBARAS Renaud, *De l'être du phénomène : sur l'ontologie de Merleau-Ponty*, Grenoble, J. Millon, coll. « Collection Krisis », 1991.

BARBEROUSSE Anouk, Denis BONNAY, Mikaël COZIC, Daniel ANDLER, Jacques DUBUCS et Paul ÉGRE, *Précis de philosophie des sciences*, Paris, France, Vuibert, 2011.

BARBEROUSSE Anouk, Max KISTLER et Pascal LUDWIG, *La philosophie des sciences au XXe siècle*, Paris, France, Flammarion, 2000.

BAEZ J, MUNIAN JP, « Gravity », Partie III, *Gauge Fields, knots and Gravity*. The ADM Formalisme, Singapore, Word Scientific, 1984, pp. 413-436.

BARGOIN Vincent, « Virus », dans *Encyclopédie Universalis*, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/virus/>

BARRAL Paul-Etienne, MOYSE, Hélène, NAU Jean-Yves, PARIS Raymond, PARIS Michel, « Médicaments », *Encyclopédie Universalis* <https://www.universalis.fr/encyclopedie/medicaments/>

BARRAU Aurélien, *Au coeur des trous noirs*, Malakoff, France, Dunod, 2017.

BARRAU Aurélien, *Des univers multiples : nouveaux horizons cosmiques*, Malakoff, France, Dunod, 2017.

BARRAU Aurélien, *Big bang et au-delà : les nouveaux horizons de l'Univers*, Paris, France, Dunod, 2016.

BARRAU Aurélien, « Peut-on tester les univers parallèles ? », *Journal du CNRS*, 3 septembre 2015 (en ligne : <https://lejournel.cnrs.fr/billets/peut-tester-les-univers-paralleles>).

BARRAU Aurélien, « Testing the Everett Interpretation of Quantum Mechanics with Cosmology », *Electronic Journal of Theoretical Physics* », *ARXIV*, 25 juin 2015 (en ligne : <https://arxiv.org/abs/1412.7352v2>).

BARRAU Hervé, « Aristotélisme », dans *Encyclopédie Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/aristotelisme/>

BARROW John D., CASSE Michel, COHEN Loïc, PAULUS Guy, *La grande théorie : les limites d'une explication globale en physique*, Paris, France, Flammarion, 1995.

BARROW John D., *Theories of Everything. The quest for ultimate explanation*, Oxford, 1991

BARSUGLIA Matteo, *Les vagues de l'espace-temps : la révolution des ondes gravitationnelles*, Malakoff, France, Dunod, 2019.

BARTELOMEI H, M KUMAR, R BISOGNIN et MARGUERITE, « Fractional statistics in anyon collisions » vol. 368 no. 6487 173-177 », *American Association for the Advancement of Science*, 10 avril 2020 <https://science.sciencemag.org/content/368/6487/173>).

BARTOLOMEO Paolo, « Perception », dans *Encyclopédie Universalis*, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/perception/>).

BASTIE Eugénie, *La Guerre des idées -Enquête au cœur de l'intelligentsia française*, Robert Laffont, 2021

BAUER Edmond, *Introduction à la théorie des groupes et à ses applications en physique quantique*. Annales de l'I. H. P., tome 4, no 1 (1933), p. 1-170 »,

BAYART Frédéric « Raisonnement par analyse-synthèse », Bibmath.net <https://www.bibmath.net/dico/index.php?action=affiche&quoi=.a/analysesynthese.html>

BEAR Mark F., CONNORS Barry W., A. PARADISO Michael et André NIEOULLON Traducteur, *Neurosciences : à la découverte du cerveau*, Paris, France, Pradel, 1997.

BEAUDE Joseph, « Mécanisme, philosophie. », dans *Encyclopédie Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/mecanisme-philosophie/>).

DE BEAUNE Sophie A, *L'émergence des capacités cognitives chez l'homme. : 1, Les premiers hominidés. 2, Les Néandertaliens, 3, Le processus de l'invention : approche cognitive*, René Treuil. L'archéologie cognitive, Maison des Sciences de l'Homme, pp.33-90, 2011, Cogniprisme. halshs-00730326 », 2011.

BEGUE Laurent, *Psychologie du bien et du mal*, Paris, France, Odile Jacob, 2011.

BELL John Lane, *Toposes and local set theories: an introduction*, New York, Etats-Unis d'Amérique, Dover publications, inc., 2008.

BELZEAUX Raoul, Jean-Michel AZORIN et Chantal HENRY, « Les tempéraments affectifs », dans : Julien-Daniel Guelfi éd., *Les personnalités pathologiques*. Cachan, Lavoisier, « Psychiatrie »,

2013 », 2013, p. 206-210.

BENIS-SINACEUR Hourya, « Idées : le platonisme phénoménologique d'Albert Lautman », *Philosophiques*, vol. 37, n° 1, 2010, p. 27-54.

BENIS-SINACEUR Hourya, « Structure et concept dans l'épistémologie mathématique de Jean Cavaillès », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 40, n° 1, 1987, p. 5-30.

BENIS-SINACEUR Hourya, « Cantor Georg - (1845-1918) », *Encyclopædia Universalis*, consulté le 12 juin 2021. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/georg-cantor/>

BENIS-SINACEUR Hourya, « Réalisme, mathématique »

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/realisme-mathematique/>).

BENOIT Marine, « Un condensat de Bose-Einstein, un “cinquième état de la matière », maintenu plus d'une seconde dans l'ISS », 12 juin 2020

https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/quantique/un-condensat-de-bose-einstein-un-cinquieme-etat-de-la-matiere-a-ete-maintenu-plus-d-une-seconde-dans-l-iss_145129

BERCHE Bertrand, « *La constante cosmologique et le déploiement de l'espace* », *Philosophia Scientiæ*, 2011/2 (15-2), p. 123-135. DOI : 10.4000/philosophiascientiae.659. », *Cairn*, <https://www.cairn.info/revue-philosophia-scientiae-2011-2-page-123.htm>).

BERNARDEAU Francis, *Cosmologie : des fondements théoriques aux observations*, Les Ulis, France, EDP Sciences, 2007.

BERSINI Hugues, SPINETTE-ROSE Marie-Paule, SPINETTE-ROSE Robert, VAN ZEEBROECK Nicolas, *Les fondements de l'informatique: du bit au cloud*, Paris, France, Vuibert, 2014.

BERTALANFFY Ludwig von, LASZLO Ervin, CHABROL Jean-Benoît, *Théorie générale des systèmes* », Bernard Paulré (éd.), Paris, France, Dunod, 2002.

BERTHOD Alain, RANDON Jérôme, « Analytique chimie », *Encyclopédie Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/chimie-analytique/>

BERTRAND Emanuel, « La Nouvelle Alliance d'I. Prigogine et I. Stengers (1979) : mise en récit apologétique de la thermodynamique ou dialogue singulier entre un physicien et une philosophe ? », *Revue d'histoire des sciences humaines* [En ligne], 30 | 2017, DOI : <https://doi.org/10.4000/rhsh.553> »,

BETTAYEB Kheira, « Des solutions pour une eau plus propre », *Journal du CNRS*, 8 juillet 2019 <https://lejournald.cnrs.fr/articles/des-solutions-pour-une-eau-plus-propre>).

BITBOL Michel, dir., *Théorie quantique et sciences humaines*, CNRS Editions, 2016.

BITBOL Michel, *De l'intérieur du monde : pour une philosophie et une science des relations*, Paris, France, Flammarion, 2010.

BITBOL Michel, *Physique et philosophie de l'esprit*, Paris, France, Flammarion, 2000.

BITBOL Michel, *L'aveuglante proximité du réel : anti-réalisme et quasi-réalisme en physique*, Paris, France, Flammarion, 1998.

BLAY Michel (éd.), *Dictionnaire des concepts philosophiques*, Paris, France, Larousse : CNRS éd., 2006.

BLONDEL Maurice, *Les premiers écrits de Maurice Blondel : essai d'une critique de la vie et d'une science de la pratique*, Association des amis de Maurice Blondel (éd.), Paris, France, Presses Universitaires de France, 1950.

BLONDEL Maurice, *L'action*, Paris, France, F. Alcan, 1937.

BOJOWALD Martin, HERMANN Jean-Paul, *L'univers en rebond : avant le big-bang*, Paris, France, Albin Michel, 2011.

BOI Luciano, *Le problème mathématique de l'espace. Une quête de l'intelligible*, Berlin, Springer, 1995.

BOISCHOT André, KOVALESKY Jean, « Aberration astronomique », Encyclopédie Universalis, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/aberration-astronomique/>

BONNAY Denis, *Textes clés de philosophie de la logique*, Vrin, 2009.

BOLDINI Pascal, « Morphismes et catégories : une lecture formelle de Piaget », *Intellectica* 1994 19 pp. 187-216

BORDRON Jean-François, « Perception et expérience », *Signata. Annales des sémiotiques / Annals of Semiotics*, n° 1, 31 décembre 2010, p. 255-293.

BOREL Georges-Antoine et Pascal BOREL, *Cerveau et éthique: au-delà du bien et du mal*, Paris, France, Éditions Glyphe, 2017.

BOUCHET François, « Contenu de l'univers », sur *Hifi Planck*, <http://public.planck.fr/notre-univers/contenu-univers>

BOUCHET François (coll.) « Planck : les données définitives de la mission soutiennent fortement le modèle cosmologique standard », sur *CNRS*, 17/07/18 <https://www.cnrs.fr/fr/planck-les-donnees-definitives-de-la-mission-soutiennent-fortement-le-modele-cosmologique-standard>).

BOUDON Raymond, DAMISCH Hubert, GOGUEL Jean et COLL., « Modèle », *Encyclopédie Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/modele/>

BOUQUET Alain, *Doit-on croire au Big bang ?*, Paris, France, Éditions Le Pommier, 2003.

BOUQUET Alain, MONNIER Emmanuel, Xuan Thuan TRINH, *Matière sombre et énergie noire : mystères de l'Univers* », Paris, France, Dunod, 2008.

BOURCQUE Pierre-André, « L'origine des minéraux », Université de Laval <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/orig.mineraux.html>

BOURDIEU Pierre, *Science de la science et réflexivité : cours du Collège de France (2000 2001)*, Paris, France, Raisons d'agir, 2001.

BOURDILLON Christian, « Notions de base sur les incertitudes et le traitement des données en physique, chimie, biologie », sur *Université de Compiègne*,

<http://www.utc.fr/~avalle/dossiers-pdf/Incertitudes-version2002.PDF>

BOUREAU Edouard, DE WEVER Patrick, PIVETEAU Jean, « Paléontologie », *Encyclopédie Universalis* <http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/paleontologie/>

BOURG Dominique, « Le changement de civilisation se fera. Il est en cours. », France inter, 2020.

BOUTEAU François et Patrick LAURENTI, « La neurobiologie végétale, une idée folle ? 10 octobre 2018 Dossier pour la science N° 101 », coll. « Pour la science »,

<https://www.pourlascience.fr/sd/biologie/la-neurobiologie-vegetale-une-idee-folle-14831.php>

BOUTOT Alain, *L'invention des formes : chaos, catastrophes, fractales, structures dissipatives, attracteurs étranges*, Paris, France, Éditions Odile Jacob, 1993.

BOUTOT Alain, « Sciences - Science et philosophie », *Encyclopédie Universalis*, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/sciences-science-et-philosophie/>

BOUVERESSE Jacques, *Langage, perception et réalité. Tome 2, Physique, phénoménologie et grammaire*, Nîmes, France, J. Chambon, impr. 2004.

BOUVERESSE Jacques, *Langage, perception et réalité. Tome 1, La perception et le jugement*, Nîmes, France, J. Chambon, impr. 1995.

BOUVERESSE Jacques (éd.), *Philosophie de la logique et philosophie du langage. I*, Paris, France, Éditions Odile Jacob, 1991.

BIPM, « Le système international d'unités, SI » Bureau International des Poids et Mesure <https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-FR.pdf/bb7be5ff-4b2f-3834-f46a-5b4af3669870>

BRECHIGNAC Catherine, *La sardine et le diamant. De l'utilité de l'ordre et du désordre*, Le Cherche-Midi, 2020

BRECHIGNAC Catherine, *Le progrès est-il dangereux ? Dialogue contre les idées reçues*, Humensciences, 2019

BRECHIGNAC Catherine, *L'irrésistible envie de savoir*, Le Cherche-Midi, 2018

BREGLIANO Jean-Claude, « Le génome entre stabilité et variabilité », *Encyclopédie de l'Environnement*, 30 mai 2021

<https://www.encyclopedia-environnement.org/vivant/genome-entre-stabilite-variabilite/>

BRISSEON Luc et F. Walter MEYERSTEIN, *Inventer l'univers : le problème de la connaissance et les modèles cosmologiques*, Paris, France, les Belles lettres, 2014.

DE BROGLIE Louis, « Recherches sur la théorie des Quanta », 1924

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807>

BRUNE Michel, « La frontière classique-quantique », *Pour la science*, consulté le 12/6/19

<https://www.pourlascience.fr/sd/physique/la-frontiere-classique-quantique-1533.php>

BRUNET Louis, « La conception leibnizienne du lieu et de l'espace ». *Laval théologique et philosophique*, 35(3), 263–277 », 1979 (en ligne : <https://doi.org/10.7202/705747ar>).

BRUTER Claude, *De la Science à la Philosophie, Hommage à Jean Largeault*, L'Harmattan, Paris, 2001, 61-78.

BUNGE Mario, « La philosophie de Niels Bohr », *Horizons philosophiques*, vol. 2, n° 2, 1992, p. 27-50.

BUONOMANO Dean et Michel LE BELLAC, *Le temps des neurones : les horloges du cerveau*, Les Ulis, France, EDP sciences, 2018.

BUSER Pierre, « Motricité », *Encyclopédie Universalis*,

BUSER Pierre, LAGET PAUL, « Hémisphères cérébraux », *Encyclopédie Universalis*,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/hemispheres-cerebraux/>

BUTTERFIELD Jeremy, « Less is Different: Emergence and Reduction Reconciled », *Arxiv*, 3 juin 2011.

C

CABANACQ S, *Philosophie des mathématiques : logique, preuve et pratiques*, Vrin, 2017.

CANGUILHEM Georges, *Le normal et le pathologique*, Presses universitaires de France, 2013.

CANGUILHEM Georges, *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie: nouvelles études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, France, Vrin, 2009.

CARAMELLO Olivia, « Les topos de Grothendieck comme 'ponts' unifiants en mathématiques »,
<https://www.oliviacaramello.com/Unification/HDRTalkOliviaCaramello.pdf>

CARIO Laurent, FELIX Sophie, « Un nouveau neurone artificiel mono-composant », sur *Institut de Chimie du CNRS -INC*, 30/01/17
<https://inc.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/un-nouveau-neurone-artificiel-mono-composant>

CARNAP Rudolf, *Signification et nécessité : une recherche en sémantique et en logique modale*, Gallimard, 1997.

CARNAP Rudolf, *Les fondements philosophiques de la physique*, Antonia Soulez et Jean Mathieu Luccioni (trad.), Paris, France, Armand Colin, 1973.

CARNOT Lazare, BACHELIER Victor, CLOQUET Jean Baptiste, *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement; par L. N. M. Carnot, de l'Institut national de France, de l'Académie des Sciences, Arts et Belles Lettres de Dijon, etc.*, Paris, 1803.

CARROLL Sean Michael, Nathalie BEDRIN et Vincent FAYE, *La face cachée de l'univers : les mondes quantiques et l'émergence de l'espace-temps*, Lausanne, Suisse, Quanto, 2020.

CARROLL Sean Michael, Nathalie BEDRIN et Vincent FAYE, *Le grand tout : sur l'origine de la vie, son sens, et l'univers lui-même*, Lausanne, Suisse, Quanto : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2018.

CASSE Michel, *Du vide et de l'éternité*, Paris, France, Odile Jacob, 2014.

CASSE Michel, *Les trous noirs en pleine lumière*, Paris, France, O. Jacob, 2009.

CASSE Michel, *Énergie noire, matière noire*, Paris, France, Odile Jacob, 2004.

CASSOU-NOGUES Pierre, *De l'expérience mathématique : essai sur la philosophie des sciences de Jean Cavaillès*, Librairie philosophique J. Vrin, 2001.

CASTIGLIONE P, FALCIONI M, LESNE A, WULPIANI A, « Physique statistique. Chaos et approches multiéchelles », Paris, Belin, pp. 97-123.

CAVEING Maurice, *Le problème des objets dans la pensée mathématique*, Paris, Vrin, 2004.

CAZALIS Roland (éd.), *Monade, dyade, triade: des approches de la réalité*, Namur, Belgique, Presses universitaires de Namur, DL 2013.

CAZENAVE. M, CASSE.M, *La science et l'âme du monde*, Paris, France, Albin Michel, 1996.

CEA « Comment voir les atomes », CEA, 25/05/15
<https://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/physique-chimie/comment-voir-atomes.aspx>

CEA « L'essentiel sur les 4 interactions fondamentales », 19/07/18
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-4-interactions-fondamentales.aspx>

CEA, « Révolutions quantiques : contexte, technologies, domaines d'application, perspective. » 06/18 <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/CLEFS66-FR-FINAL.pdf>

CENTRE D'INFORMATION SUR L'EAU, « L'eau, c'est quoi? », <https://www.cieau.com/connaitre-leau/connaitre-leau/leau-cest-quoi/>

CERN « ATLAS apaise les tensions avec le Modèle standard », 29/07/20
<https://home.cern/fr/news/news/physics/atlas-result-addresses-long-standing-tension-standard-model>

CERN, « La supersymétrie », <https://home.cern/fr/science/physics/supersymmetry>

CHALMERS Alan Francis, BIEZUNSKI Michel, *Qu'est-ce que la science ? Récents développements en philosophie des sciences*, Paris, France, Éditions La Découverte, 1987.

CHALMERS David John, MANLEY David, WASSERMAN Ryan (éd.), *Metametaphysics: new essays on the foundations of ontology*, Oxford, Clarendon Press, 2009.

CHANGEUX Jean-Pierre et Claude DEBRU, *Du vrai, du beau, du bien : une nouvelle approche neuronale*, Paris, France, Odile Jacob, 2008.

CHAPELLE Albert, *L'ontologie phénoménologique de Heidegger: un commentaire de « Sein und Zeit* », Paris, Éditions universitaires, coll. « Encyclopédie universitaire », 1962.

CHAQUIN P, « Symétrie moléculaire Éléments de théorie des groupes¹ », sur *Université de Jussieu*, <https://www.lct.jussieu.fr/pagesperso/chaquin/5.GroupesSymetrie.pdf>

CHARBONNAT P, *Histoire des philosophies matérialistes*, Syllepse, 2007

CHARDIN Gabriel, *L'insoutenable gravité de l'Univers*, Paris, France, Le Pommier, 2018.

CHENET François, *Le temps: temps cosmique, temps vécu*, Paris, France, Armand Colin, 2000.

CHEVALIER Jean-Marie, « Des formes logiques aux formes métaphysiques : abstraction ou

déduction ? », Collège de France, 2013

<https://www.college-de-france.fr/site/claudine-tiercelin/symposium-2013-01-17-14h00.htm>

CHEVALLEY Catherine, « Complémentarité et langage dans l'interprétation de Copenhague », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 38, n° 3, 1985, p. 251-292.

CHNEIWEISS Hervé, « Brève esquisse neurophysiologique de l'excitation : des neurones, des astrocytes et des images », *Revue française de psychanalyse*, vol. 69, 2005, p. p.21-28.

CIPRIANI Nicola, ALFONSI Marie-Hélène, SOBECKI Catherine, *Minéraux et roches : recherche, classification, utilisation*, Paris, France, Gründ, 1996.

CISLARU Georgeta, GUERIN Olivia, MORIM Katia, NEE Émilie, PAGNIER Thierry, VENIARD Marie (dir.) *L'acte de nommer : Une dynamique entre langue et discours*, Paris, Presses Sorbonne Nouvelle, coll. Sciences du langage, 2017.

CLAUDON Philippe, WEBER Margot, « L'émotion. Contribution à l'étude psychodynamique du développement de la pensée de l'enfant sans langage en interaction. », *Cairn*, vol. 21, 01/2009, CNRS le journal, « L'ingénierie passe au vert », 2019

<https://lejournel.cnrs.fr/dossiers/lingenierie-passe-au-vert>

CLAPIER-VALLADON S, *Les théories de la personnalité*, Que sais-je ?, PUF, 1979

COADOU François, « Pour une lecture de Philosophie première de Vladimir Jankélévitch (1954) », *Cairn*, vol. 3, n° 15, 2001, p. p/197-202.

CODRIN-CHIRICA Valentin, George BODI et Vasile CHIRCA, « Phénomène funéraire dans le paléolithique de l'Europe. La spiritualité de la déposition d'offrandes aux tombeaux . », *Studia Antiqua et Archaeologica XVIII*, n° 80, mai 2012.

COHEN-TANNOUDJI Gilles, « A new scientific revolution at the horizon? », *Researchgate*, juillet 2007

COHEN-TANNOUDJI Gilles, « L'unification des interactions fondamentales », 1991.

<https://isidore.science/document/http://hdl.handle.net/2042/8255>

COLLINS T, ANDLER D et TALLON-BAUDRY C, *La cognition: du neurone à la société*, Paris, France, Gallimard, 2018.

COLLION Stéphane, *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps : trous noirs, big-bang, singularités*, Les Ulis, France, EDP sciences, 2018.

COLLOT Johann, « Édification de la théorie des interactions électrofaibles »,

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/cours/ElectroFaible.pdf>

COMBES Françoise, *Le big bang*, Paris, France, Que sais-je ? / Humensis, 2019.

COMBES Françoise, « Constante cosmologique, ou quintessence ? », sur *Collège de France*, 16 janvier 2017.

COMBES Françoise, *La matière noire : clé de l'Univers ?*, Paris, France, Vuibert, 2017.

COMBES Françoise, « Avec le problème de la matière noire, l'astronomie vit une crise »Propos

recueillis par Sylvain Guilbaud dans mensuel 540 daté octobre 2018 », sans date, La Recherche

COMTE Auguste, *Cours de philosophie positive Tome I*, L'Harmattan, 1830.

COMTE Auguste, *Cours de philosophie positive Tome II*, L'Harmattan, 1830.

COMTE Auguste, *Cours de philosophie positive Tome III*, L'Harmattan, 1830.

COMTE-SPONVILLE André, *Petit traité des grandes vertus*, Paris, France, PUF, 1995.

CONNES A, *On the fine structure of spacetime*, in *On space and Time* (s. Meyed, ed), Cambridge University Press, 2008, pp.196-237, D.Mc Mahon, "String Theory Demystified" New York, McBras Hil, 2009.

CONNES Alain, *Géométrie non commutative*, Paris, France, Dunod, 2005.

COOPER Geoffrey M., FRANÇOIS Camille, FRANÇOIS Jean-Marc, *La cellule : une approche moléculaire*, Bruxelles, Belgique, France, 1999.

CORDIS, « Un être vivant ... sans oxygène », sur CORDIS, 27/04/10
<https://cordis.europa.eu/article/id/32030-creature-alive-and-kicking-sans-oxygen/fr>

COSTANTINO Francois, « Réseaux de spin et leur géométrie », sur Université de Grenoble, 2012
<https://www-fourier.univ-grenoble-alpes.fr/?q=fr/content/réseaux-de-spin-et-leur-géométrie>

COURNOT Antoine-Augustin, *Matérialisme, vitalisme, rationalisme: étude sur l'emploi des données de la science en philosophie : troisième et quatrième sections*, Paris, Vrin, 1986.

COURTOIS Hélène et Françoise Préfacier COMBES, *Voyage sur les flots de galaxies: Laniakea, notre nouvelle adresse dans l'Univers*, Malakoff, France, Dunod, 2016.

COUTELLEC Léo (dir.), *De la démocratie dans les sciences. Épistémologie, éthique et pluralisme*, Paris, Éditions Matériologiques, Sciences & philosophie, 2013, p. 183-198.

COUTELLEC Léo, *La science au pluriel : essai d'épistémologie pour des sciences impliquées*, Versailles, France, Éditions Quae, 2015.

CRIBIU Edmond Paul et Laurent SCHIBLER, « Introduction à la cartographie des génomes complexes », sur *ResearchGate*, 2000

CRUBEZY Éric, *Aux origines des rites funéraires : voir, cacher, sacraliser*, Paris, France, Odile Jacob, 2019.

CURIE Pierre, « Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique ». *J. Phys. Theor. Appl.*, 1894, 3 (1), pp.393-415.

CURTIS G, Juan M CALLAN et MALDACENA, « D-brane Approach to Black Hole Quantum Mechanics », *Arxiv*, 1996, <https://arxiv.org/abs/hep-th/9602043>

D

DE GOSSON Maurice, *Wigner Transform*, World Scientific, 2017.

DAHAN Amy, PEIFFER Jeanne, DESANTI Jean-Toussaint, *Une histoire des mathématiques : routes et dédales*, Paris, France, Éditions du Seuil, 1986.

DALIBARD Jean, « Quand la matière devient topologique : l'exemple des gaz d'atomes et de photons », sur Culture Sciences Physiques, 15/10/18

DAMASIO Antonio R., *Sentir et savoir : une nouvelle théorie de la conscience*, Paris, France, Odile Jacob, 2021.

DAMASIO Antonio R., *L'erreur de Descartes: la raison des émotions*, Marcel Blanc (trad.), Paris, France, Odile Jacob, 2010.

DAMOUR Thibault, « Physique et Réalité : implications philosophiques de la physique moderne », https://www.ihes.fr/~damour/Conferences/damour_AkaroaSMU_singapour.pdf

DAMOUR Thibault, DESER Stanley, « Relativité générale », Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/relativite-relativite-generale/>

DANCHIN Antoine, « Biologie théorique et philosophie », sur Normale sup, <https://www.normalesup.org/~adanchin/AD/ch3.html>

DAVIAU Claude, « Vers une mécanique quantique sans nombre complexe ». Annales de la Fondation Louis de Broglie, Volume 26 n° spécial, 2001, sur Fondation de Broglie, 2001.

DE DUVE Christian, *À l'écoute du vivant*, Paris, France, Odile Jacob, DL 2002.

DEBRU Claude, *Georges Canguilhem: science et non-science*, Paris, Éditions Rue d'Ulm, 2018.

DEFOSSEZ Pierre-Antoine, KIRSH Olivier, NACIRI Ikrame, « Epigénétique. », Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.u-paris.fr/encyclopedie/epigenetique/>

DEHAENE Stanislas, *Le code de la conscience*, Paris, France, Odile Jacob, 2014.

DEHAENE Stanislas, « Comment notre cerveau calcule-t-il ? », *Pour la science*, n° 236

DEHEUVELS Paul, *La Probabilité, le hasard et la certitude*, Paris, France, PUF, 1990.

DEJOURS Christophe, *Le facteur humain*, Paris, France, PUF, 2014.

DELAHAYE Jean-Paul, *TOUT. Les rêves mathématiques d'une théorie ultime*, Paris, Hermann, 2011

DELAHAYE Jean-Paul (Coll.), *L'infini dans les sciences, l'art et la philosophie*, Paris, L'Harmattan, coll. Les rendez-vous d'Archimède, 2003

DELAHAYE Jean-Paul, « Modélisation, mathématique » - Encyclopédie Universalis <https://www.universalis.fr/encyclopedie/modelisation-mathematique/>

DELAHAYE Jean-Paul, « Nominalisme, mathématique », Encyclopédie Universalis <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/nominalisme-mathematique/>.

DELAMOTTE Bertrand, *Un soupçon de théorie des groupes : groupe des rotations et groupe de Poincaré. DEA. 2006. cel-00092924* », 2006. HAL.

DELARUE Catherine, « Identification et Réel », *Analyse Freudienne Presse*, n° 17, n° 1, 2010, p. 47-55.

DELAUNAY Alain, « Néguentropie », dans *Encyclopédie Universalis*, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/neguentropie/>

DELAUNAY Alain, « Abstraction », dans *Encyclopédie Universalis*,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/abstraction/>

DELEUZE Gilles, *Différence et répétition*, Paris, France, PUF, 1993.

DELMAS-RIGOUTSOS Yannis, « Logique quantique », Séminaire de Philosophie et Mathématiques, n° 5, 1993, p. 1-23.

DEMERY Vincent, PELONI Giovanni, « Introduction à la théorie des cordes », sur *Université de Toulouse*, 2008 https://www.lpt.ups-tlse.fr/IMG/pdf_Rapport_Stage.pdf

DENIAU Guy, *Qu'est-ce qu'interpréter ?*, Paris, France, Vrin, 2015.

DENIAU Guy, *Qu'est-ce que comprendre ?*, Paris, France, Vrin, 2008.

DEPARIS Vincent, LEGROS Hilaire, POIRIER Jean-Paul, *Voyage à l'intérieur de la Terre: de la géographie antique à la géophysique moderne*, Paris, France, CNRS éditions, 2000.

DEPOVERE Paul, *La classification périodique des éléments : la merveille fondamentale de l'Univers*, Bruxelles, Belgique, De Boeck, 2002.

DEPRAZ Natalie, BERNET Rudolf, *Transcendance et incarnation : le statut de l'intersubjectivité comme altérité à soi chez Husserl*, Paris, France, Vrin, 1995.

DESPRET S. A. de la postface Durand et B. A. de la postface Morizot, *Habiter en oiseau*, Arles, France, Actes sud, 2019.

DESANTI Jean-Toussaint, « Fondement des mathématiques » - Encyclopédie Universalis », <https://www.universalis.fr/encyclopedia/fondements-des-mathematiques/>

DESCOLA Philippe (dir.), *Les natures en question*, Paris, France, Odile Jacob, 2018.

DESCOMBES Vincent, *Le même et l'autre : quarante-cinq ans de philosophie française (1933 1978)*, Paris, France, Les Editions de Minuit, 1979.

DESIRE Naddley, « Identification des corrélats neuronaux associés à la clôture perceptive des objets : une étude en potentiels évoqués »

<https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/13736>

DEUTSCH David, TREINER Jacques, GICQUEL Françoise, *Le commencement de l'infini : les explications transforment le monde*, Paris, France, Cassini, 2016.

DEVINCK Frédéric, *Les traitements visuels chez l'homme : stratégies de classification de la forme.*, Thèse, université de Lyon,

http://theses.univ-lyon2.fr/documents/lyon2/2003/devinck_f#p=0&a=title

DIETERLEN Françoise, « Biologie - la construction de l'organisme », Encyclopédie Universalis <https://www.universalis.fr/encyclopedia/biologie-la-contruction-de-l-organisme/>

DOLE Hervé, LENA Pierre, *Le côté obscur de l'univers*, Malakoff, France, Dunod, 2017.

DOWEK Gilles, *Les métamorphoses du calcul : une étonnante histoire de mathématiques*, Paris, France, Le Pommier, 2017.

DU SAUTOY Marcus, CLARINARD Raymond, *Ce que nous ne saurons jamais*, Paris, France, Flammarion, 2019.

DUBOIS Michel et Nicolas BRAULT, « Chapitre 7. Philosophie de l'ingénierie et de la conception »
 Manuel d'épistémologie pour l'ingénieur.e. sous la direction de Dubois Michel J. F, Brault
 Nicolas. Paris, Éditions Matériologiques, " Essais ". », *Cairn*, 2021, p. 153-163.

DUCAUZE Christian, THIS Hervé, « Les opérateurs de la mécanique quantique », *Agro Paris
 Tech*,: http://www2.agroparistech.fr/IMG/pdf/CHAPITRE_III_MQ-3.pdf

DUFOUR Jean-Philippe, *Introduction à la géodésie*, Paris, France, Hermès science, 200.

DUMERY Henry, « Analyse réflexive », *Encyclopédie Universalis*,
<http://www.universalis.fr/encyclopedie/analyse-reflexive/>

DUMONT Joey, « Formalisme lagrangien et théories de jauge », 2012
<http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/pp/12jaugesurreseau/text/ssec11.html>

DUPRÉ John, *The disorder of things: metaphysical foundations of the disunity of science*, 1993.

DUTANT Julien, ENGEL Pascal, *Philosophie de la connaissance : croyance, connaissance,
 justification*, Vrin, 2005.

DUVAL Céline, PIOLINO Pascale, BEJANIN Alexandre, « La théorie de l'esprit : aspects
 conceptuels, évaluation et effets de l'âge ». *Revue de neuropsychologie*, *Cairn*, vol. 3, n° 1, 2011.

DZIERBA Alex, ISGUR Nathan, « Des particules exotiques pour comprendre le confinement
 des quarks », *Courrier du CERN*, 2000.
<http://cds.cern.ch/record/1740315/files/vol40-issue7-p023-f.pdf>

E

ÉCOLE POLYTECHNIQUE, « Les systèmes complexes »
<http://www.enseignement.polytechnique.fr/informatique/chaire-systemes-complexes/-Les-systemes-complexes-.html>

ECKES Christophe, « Principes d'invariance et lois de la nature d'après Weyl et Wigner »,
Philosophia Scientiæ. n° 16-3, 1^{er}/11/12, p. 153 176.

EINSTEIN Albert, INFELD Léopold, *L'évolution des idées en physique : des premiers concepts aux
 théories de la relativité et des quanta*, Maurice Solovine (trad.), Paris, France, Payot, 1978.

EINSTEIN Albert et Maurice SOLOVINE, *La relativité: la théorie de la relativité restreinte et
 Générale*, Paris, France, Payot, 1979.

Ellul Jacques, *Le Système Technicien.*, Apple books.

Encrenaz T, Lequeux J et Casoli F, *Les planètes et la vie*, Les Ulis, France, EDP sciences, 2019.

ENDO Charles-Anica, « Par-delà Heidegger et Watsuji : ontologie, tout et mécanique
 Quantique », 2015 <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/26317>

ENGEL Pascal, « Modalités, logique », *Encyclopædia Universalis*
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/modalites-logique/>

ENGELS Friedrich et Émile BOTTIGELLI, *Dialectique de la nature*,

Paris, France, Éditions sociales, 1977.

ENS LYON, « Les étapes de la formation de la Terre », 23/01/21

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/Temps/allee/comprendre/les-etapes-de-la-formation-de-la-terre>

ESFELD Michael, « Formes, objets et dispositions en philosophie de la physique contemporaine », Collège de France, 2013

<https://www.college-de-france.fr/site/claudine-tiercelin/symposium-2013-01-18-09h30.htm>

ESPAGNAT Bernard d', *Le réel voilé: analyse des concepts quantiques*, Paris, France, Fayard, 1994.

F

FAGOT-LARGEAULT Anne, LENA Pierre et COMBES Françoise, *Ontologie du devenir : l'évolution, l'univers et le temps*, Paris, France, Odile Jacob, 2021.

FALCONER K, « Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications. », Wiley, 1990.

FAURE Alexandre, « La relativité et ses applications », sur 3AF, Association Aéronautique et Astronautique, 2011: https://3af-mp.fr/wp-content/uploads/2016/03/Relativite_Generale.pdf).

FAURE Cédric, « « Le rôle de l'imagination créative dans la vie psychique » 2015/1 (Numéro 105), p. 85-93. DOI : 10.3917/cips.105.0085. », *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale*

FAURE Sylvane, HABIB Michel, JOANETTE Yves, « *Hémisphère droit, hémisphère gauche et cognition* », dans : Francis Eustache éd., *Traité de neuropsychologie clinique*. Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur, « Neurosciences & cognition. Chapitre 26. », Cairn, 2008, p. 561-623.

FAVARD Nina, « Mitose », Encyclopédie Universalis,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/mitose/>

FEDERATION POUR LA RECHERCHE SUR LE CERVEAU, « Le Neurone » FRC,

<https://www.frcneurodon.org/comprendre-le-cerveau/a-la-decouverte-du-cerveau/le-neurone/>

FEGHALY Nada, « Les frontières entre la logique et les mathématiques : le point de vue de Gilles Gaston Granger », *Philosophia Scientiæ*, 20-2 | 2016, 159-175

<https://journals.openedition.org/philosophiascientiae/1191#bodyftn3>

FELTZ Bernard, in J.-F. Malherbe (dir.), *La responsabilité de la raison: hommage à Jean Ladrière à l'occasion de son 80e anniversaire*, Louvain-la-Neuve, Belgique, France, Éd. de l'Institut supérieur de philosophie, 2002.

FEMENIAS J-L, *Introduction au calcul variationnel en physique. Aperçu historique et application*, Paris, Ellipse, pp.173-183.

FEYERABEND Paul, *Contre la méthode : esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Baudouin Jurdant et Agnès Schlumberger (trad.), Paris, France, Éditions du Seuil, 1988.

FEYNMAN Richard Phillips, Françoise BALIBAR et Alain LAVERNE, *Lumière et matière : une*

étrange histoire, Paris, France, Seuil, 1992.

FINEGOLD David N., « Gènes et chromosomes », 10/19

<https://www.msdmanuals.com/fr/accueil/fondamentaux/genetique/genes-et-chromosomes>

FISSETTE Denis, POIRIER Pierre, *Philosophie de l'esprit. Tome 2. Problèmes et perspectives*, Vrin, 2004.

FISSETTE Denis, POIRIER Pierre, *Philosophie de l'esprit. Tome 1. Psychologie du sens commun et sciences de l'esprit*, Vrin, 2001.

FISZMAN Marc-Yves, « Développement (biologie) - le développement animal »

Encyclopédie Universalis

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/developpement-biologie-le-developpement-animal/>

FLAMENT Dominique, *Histoire des nombres complexes : entre algèbre et géométrie*, Paris, France, CNRS Éd., 2003.

FOESSEL Michaël, GINGRAS Yves, LADRIERE Jean, « Connaissance », Encyclopédie

Universalis 15/10/20. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/connaissance/>

FONDATION RECHERCHE MEDICALE, « Tout savoir sur la douleur »,

<https://www.frm.org/recherches-maladies-neurologiques/douleur/focus-douleur>

FOREST Denis, « Ni élimination, ni réduction, ni intégration alors quoi ? Sciences de l'esprit, neurosciences et modèle instrumental », 1/1/09

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02126753>

FOREST Denis, « Le schéma, l'image et le temps. », 2010

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00982282>

FORTERRE Patrick, « Luca, une cellule, un monde et nous », Journal du CNRS,

<https://lejournel.cnrs.fr/billets/luca-une-cellule-un-monde-et-nous>

FOUQUET Emmanuel et HACHETTE (éd.), *Dictionnaire Hachette encyclopédique illustré*, Paris, France, 2000.

FRIEDMANN A, LEMAITRE G, *Essais de cosmologie*, Précédés de l'invention du Big Bang par JP Luminet, Paris, Seuil, 1987.

FUTURA SCIENCES « Quelle est l'origine de l'eau des océans ? », *Futura Sciences*, 30/04/21

<https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/origine-eau-origine-eau-oceans-1043/>

G

GACHELIN Gabriel, « Biologie - la biologie moléculaire », *Encyclopédie Universalis*,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/biologie-la-biologie-moleculaire/>

GANDON Sébastien, *Logique et langage chez le premier Wittgenstein: une lecture du tractatus logico-philosophicus à la lumière de Frege et de Russell*, Lille, France, Atelier national de Reproduction des Thèses, 2001.

GARNIER Sophie, « La dérive génétique », sur *ENS Planet vie*, 16/05/11

<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/evolution/mecanismes-theories-et-concepts-de-l-evolution/la-derive-genetique>

GAUTHIER Yvon, *Sciences et réalité. Gilles-Gaston Granger*, Paris : O. Jacob, 2000 (Philosophie). 262 p. », *Horizons philosophiques*, vol. 12, n° 2, 2002, p. 139-140.

GAYON J et al., *L'identité: dictionnaire encyclopédique*, Paris, France, Gallimard, 2020

GELL-MANN MURRAY, *Le quark et le jaguar: voyage au coeur du simple et du complexe*, Gilles Minot (trad.), Paris, France, Flammarion, 1997.

GIÃO Antonio, « Théorie des rapports entre gravitation et électromagnétisme et ses applications astrophysiques et géophysiques ». *J. Phys. Radium*, 1949, 10 (7-9), pp.240-249.

10.1051/jphysrad:01949001007-9024000 . jpa-00234178 ».

GIBELLO Bernard, « La question du fond et de la forme des représentations mentales », *Le Journal des psychologues*, 2006/1 (n° 234), p. 43-48. DOI : 10.3917/jdp.234.0043. », *Cairn*.

GILMORE R, *Lie Groups, Lie Algebras and some of their applications*, Wiley, 1974.

GIULINI D , *Decoherence and The Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Berlin, Springer, 1996.

GLAESER Georges, « Axiomatique », *Encyclopédie Universalis*,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/axiomatique/>).

GLANSDORFF Paul, « Thermodynamique - vue d'ensemble », *Encyclopédie Universalis*,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/thermodynamique-vue-d-ensemble/>).

GODANI Paolo, *Traits : une métaphysique du singulier*, PUF, 2020.

GOODMAN Nelson et Hilary Whitehall PUTNAM, *Faits, fictions et prédictions*, Robert Larose, Yvon Gauthier et Roland Houde (éd.), Martin Abran (trad.), Paris, France, Éd. de Minuit, 1984.

GONDRAN M, A.GONDRAN A, *Mécanique quantique. Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?* Paris, Ed. Matériologiques, 2014.

GOSSEN Maurice A. de, *The Wigner transform*, New Jersey, Singapour, 2017.

GOURGOULHON Éric, « L'espace-temps et les ondes gravitationnelles. », sur LUTH,
https://www.luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/present_pub/les_houches_pub18.pdf

GRANGER Gilles-Gaston, *La science et les sciences*, Paris, France, PUF, 1995.

GRANAROLO P, « La vérité est l'adéquation de la chose et de l'intellect traduction in Vérité », dans *Encyclopédie Universalis*, s. d. (en ligne : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/verite-notions-de-base/>)

GROLEAU Etienne, *L'infini : utilisations de diverses conceptions de l'infini dans la philosophie, de l'origine du concept à aujourd'hui*, thesis, Corpus UL, 2008.

GRONDIN Jean, « La métaphysique du sens des choses », *Philosophiques*, vol. 41, n° 2, 2014, p. 351-357.

GUAY Alexandre, *La symétrie de jauge comme sonde philosophique*, Louvain, 2013.

GUAY Alexandre, *Symétrie : réflexions sur les formes naturelles*, Thèses, 2003.

GUBSER Steven S., BAMBAGGI Julien, *Petite introduction à la théorie des cordes*, Dunod, 2012.

GUELFY Julien-Daniel, « Le concept de personnalité, du normal au pathologique », dans *Psychiatrie*, 2013, p. P 1-12.

GUEROULT Martial, *Histoire de la philosophie : idées, temporalités et contextes*, Vrin, 2018.

GUILBAUD Sylvain, « Les nouveaux défis de la spintronique », *Journal du CNRS*, 24/05/16 <https://lejournald.cnrs.fr/articles/les-nouveaux-defis-de-la-spintronique>).

GUIDRY M, *Gauge Field Theories. An introduction with Applications*, Wiley, 1999.

GUILBAUD Sylvain, « La seconde révolution quantique conduira à des applications inédites Entretien avec Alain Aspect », vol. 547, coll. La Recherche », 05/19, p. 40-43.

GUSDORF Georges, « Matérialisme » *Encyclopédie Universalis*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/materialisme/>

H

HACKING Ian, *Concevoir et expérimenter : thèmes introductifs à la philosophie des sciences expérimentales*, Bernard Ducrest (trad.), Paris, France, Christian Bourgois éditeur, 1989.

HALIOUA Bruno, PRASQUIER Richard, HIRSCH Emmanuel, *Le procès des médecins de Nuremberg: l'irruption de l'éthique médicale moderne*, Paris, France, Vuibert, 2007.

HALPIN Harry, « Ingénierie philosophique. Vers une philosophie du Web », *Persée*, Philosophie du Web et Ingénierie des Connaissances, n° 61, 2014, p. p.41-57.

HAMBURGER Jean, *La philosophie des sciences aujourd'hui*, Paris, Gauthier-Villars, 1986.

HAMMOU Karim, « Philosophie & ingénierie. Le formel face à l'histoire, la technologie et la matérialité », sur *Calenda*, 26/02/11 <https://calenda.org/203466?lang=pt>

HANSENNE M, *Psychologie de la personnalité*, Louvain la neuve, Belgique, De Boeck, 2015.

HAUCHECORNE Bertrand, *Les mots & les maths : dictionnaire historique et étymologique du vocabulaire mathématique*, Paris, France, Ellipses, 2014.

HAWKING Stephen, BOUQUET Alain, *Commencement du temps et fin de la physique ?* Catherine Chevalley (trad.), Paris, France, Flammarion, 2011,

HAWKING Stephen et Christian CLER, *L'univers dans une coquille de noix*, Paris, France, 2001.

HAWKING Stephen, Roger PENROSE, Françoise BALIBAR, LACHIEZE-REY Marc, *La nature de l'espace et du temps*, Paris, France, Gallimard, 1997.

HAYES H, « Notions de base de la génétique ». Productions Animales, 2000, hors-série Génétique moléculaire, *INRA Laboratoire Génétique Biochimique*, 2000.

HEISENBERG W et P. KESSLER, *La partie et le tout: le monde de la physique atomique*, Paris, France, Flammarion, 1990.

HEGEL Georg Wilhelm Friedrich et Maurice de GANDILLAC, *Encyclopédie des sciences philosophiques en abrégé*, Paris, France, Gallimard, 1990.

HERACLITE, « Les fragments d'Héraclite traduits et commentés par Simone Weil. », sur Agora, <http://agora.qc.ca/dossiers/Heraclite>).

HIERNAUX Quentin (coll.) , *Philosophie du végétal*, Vrin, 2021

HORGAN John, « Why String Theory Is Still Not Even Wrong », *Scientific American*, 27/04/17 <https://blogs.scientificamerican.com/cross-check/why-string-theory-is-still-not-even-wrong/>).

HOTTOIS Gilbert, FAGOT-LARGEAULT Anne, *Philosophies des sciences, philosophies des techniques*, Paris, France, Odile Jacob, 2004.

HOTTOIS Gilbert, *Penser la logique: une introduction technique et théorique à la philosophie de la logique et du langage*, Bruxelles, Belgique, De Boeck ,2002.

HOUDE Oliver, *Comment raisonne notre cerveau*, Que sais-je, 2019.

HOUDEBINE Louis-Marie, « Génie génétique », Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/genie-genetique/>).

HUANG Kerson, “Quantum Field Theory. From Operators to Path Integrals”, New York, John Wiley, 1998.

HUANG Juebin, « Revue générale des fonctions cérébrales », sur *Manuel MSD*, 07/20 <https://www.msmanuals.com/fr/professional/troubles-neurologiques/fonction-etdysfonctionnement-des-lobes-cerebraux/revue-generale-des-fonctions-cerebrales>).

HULAK Florence, Girard Charles (dir.), *Philosophie des sciences humaines*, Vrin, 2018.

HUSSET P, « Le monopole magnétique », *La Recherche*, n°146, Juillet-août 1983, pp. 946-954.

I

IGNASSE Joël, « La décohérence prise sur le vif », article sur science et avenir, 29/09/08 https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/la-decoherence-prise-sur-le-vif_22114).

INCERTI Sébastien (Coll.) « La radioactivité moteur de l'émergence de la vie ? », IN2P3, CNRS, 29/06/21 <https://in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-radioactivite-naturelle-moteur-de-lemergence-de-la-vie>

IN2P3, « Observation d'un excès d'événements dans l'expérience de recherche directe de matière noire XENON1T », 17/06/20 <https://in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/observation-dun-exces-devenements-dans-lexperience-de-recherche-directe-de-matiere-noire>).

INRAE, « La conscience animale - Résumé de l'expertise scientifique collective », INRAE, 05/17 <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/esco-conscience-animale-resume-francais-8-pages.doc.pdf>

INSERM, « Les vaccins à ARNm susceptibles de modifier notre génome, vraiment ? », 14/12/20

<https://presse.inserm.fr/les-vaccins-a-armm-susceptibles-de-modifier-notre-genome-vraiment/41781/>).

INSERM, « Thérapie génique : Une recherche de longue haleine qui porte ses fruits », 12/07/17

<https://www.inserm.fr/dossier/therapie-genique/>

INSERM, « Communiqué – salle de presse INSERM de la pluripotence à la totipotence »,

3/8/15<https://presse.inserm.fr/de-la-pluripotence-a-la-totipotence/20082>

INSTITUT DU CERVEAU, « Les neurosciences », sur ICM,

<https://institutducerveau-icm.org/fr/neurosciences/>

ISAYE Gaston, « La justification critique par rétorsion », Revue Philosophique de Louvain,

Troisième série, tome 52, n°34, 1954

J

JANKELEVITCH Vladimir, *Philosophie première : introduction à une philosophie du presque*, Paris, France, PUF 1986.

JENSEN Pablo, *Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations*, Paris, Seuil, 2018

K

KAHAN Théo (dir), *Théorie des groupes en physique classique et quantique*, Paris, Dunod, 1971, pp.233-280 (chapitre : « Théorie des groupes et théorie ergodique », écrit par R. Jancel).

KAHN Axel, *Et le bien dans tout ça ?*, Paris, France, Éditions Stock, 2021.

KAHN Axel, Philippe LHERITIER, PICARD Marguerite, « Génétique », Encyclopédie Universalis,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/genetique/>

KAMOUN Pierre, « Biochimie », Encyclopédie Universalis, s.d

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/biochimie/>

KANT Emmanuel, *Critique de la raison pure*, Flammarion, 2006

KANT Emmanuel, *Critique de la faculté de juger*, Flammarion, 2015

KAUARK-LEITE Patricia, *Vers une critique de la raison quantique : les approches transcendantales en mécanique quantique*, thesis, Le serveur TEL (thèses-en-ligne), 2004.

KAUFFMAN Stuart Alan, BAMBAGGI Julien, *Au-delà de la physique : un nouveau regard sur l'origine de la vie*, Malakoff, France, Dunod, 2021.

KEIJI Nishitani, « Le problème de l'être et la question ontologique », Laval théologique et philosophique, vol. 64, n° 2, 2008, p. 305-325.

KEVORKIAN Gilles, *Le langage*, Paris, France, Vrin, 2013.

KILMISTER CW, *Eddington's search for a fundamental Theory*, Cambridge University Press, 1994.

KIM Jaegwon, Max KISTLER, François ATHANE et Édouard GUINET, *L'esprit dans un monde*

physique essai sur le problème corps-esprit et la causalité mentale, Paris, Ithaque, 2014.

KIM Jaegwon, *Trois essais sur l'Emergence*, Ithaque, 2006.

KITCHER Philip, *Science, vérité et démocratie*, Stéphanie Ruphy (trad.), Paris, France, Presses universitaires de France, 2010.

KLEIN Étienne, *L'unité de la physique*, Paris, PUF, 2014.

KLEIN Étienne, *Discours sur l'origine de l'univers*, Paris, France, Flammarion, 2012.

KLEIN Étienne, Philippe BRAX et Pierre VANHOVE (éd.), *Qu'est-ce que la gravité ? le grand défi de la physique*, Malakoff, France, Dunod, 2019.

KLEIN Étienne et Marc LACHIEZE-REY, *La quête de l'unité : l'aventure de la physique*, Paris, Librairie générale française, coll. « Biblio essais », n° 4298, 2000.

KOSMANN-SCHWARZBACH Yvette, Emmy NOETHER et Laurent MEERSSEMAN, *Les théorèmes de Noether: invariance et lois de conservation au XXe siècle*, France, Éditions de l'École polytechnique, 2006.

KUHN Thomas Samuel, Laure MEYER et Jean-Pierre LUMINET, *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, France, Flammarion, 2018.

L

L'HERITIER P, Lamotte M et Pantin E, « Polymorphisme, biologie », dans Encyclopédie Universalis. s.d (en ligne : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/polymorphisme-biologie/2-structure-genetique-d-une-population/>)

LAAGE Damien, « Comment marchent les enzymes ? », sur ENS Chimie, <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-organique/catalyse/comment-marchent-les-enzymes>

LACHIEZE-REY Marc (éd.), *L'espace physique entre mathématiques et philosophie*, Les Ulis, France, EDP sciences, 2006.

LACHIEZE-REY Marc, *Initiation à la cosmologie*, Paris, France, Dunod, 2004.

LACHIEZE-REY Marc, « Big-Bang », dans Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis-edu.com.ezproxy.u-paris.fr/encyclopedie/big-bang/>

LACRAMPE Olivier, *UE 2.1: Biologie fondamentale*, Paris, France, Vernazobres-Grego, 2011.

LACROIX Alexandre, *Devant la beauté de la nature*, Paris, France, Allary éditions, 2018

LADRIERE Jean, *Les limitations internes des formalismes : étude sur la signification du théorème de Gödel et des théorèmes apparentés dans la théorie des fondements des mathématiques*, Sceaux, France, Editions Jacques Gabay, DL 1992,

LADRIERE Jean, « Sciences - sciences et discours rationnel », *Encyclopédie Universalis*: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/sciences-sciences-et-discours-rationnel/>

LADRIERE Jean, « Système, épistémologie. », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/systeme-epistemologie/>

LADRIERE Jean, « La philosophie des mathématiques et le problème du formalisme », *Revue Philosophique de Louvain*, Troisième série, tome 57, n°56, 1959, p. 600-622

LADRIERE Jean, « Le rôle du théorème de Gödel dans le développement de la théorie de la démonstration », *Revue Philosophique de Louvain*, Troisième série, tome 47, n°16, 1949

LADRIERE Jean, *L'éthique dans l'univers de la rationalité*, Namur, Ed. Artel, Montréal, Ed.Fides, 1997.

LADRIERE Jean, *L'existence, la raison et l'éthique*, UCL, Presses Universitaires de Louvain 2017.

LAGET Paul, « Bulbe rachidien », Encyclopédie Universalis,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/bulbe-rachidien/>

LAGUËS Michel, LESNE Annick, *Invariances d'échelle: des changements d'états à la turbulence*, Paris, France, Belin, 2008.

LAHLOU Brahim, « Osmorégulation », Encyclopédie Universalis,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/osmoregulation/>

LALANDE André et René POIRIER, *Vocabulaire technique et critique de la philosophie. volume 2, N-Z*, Société française de philosophie (éd.), Paris, France, PUF, 1991.

LALOT Mathilde, Vanessa NUROCK et Dalila BOVET, « L'éthique animale au croisement des perspectives de recherche entre éthologie et philosophie » Tome IV-N°1
Histoire de la recherche contemporaine, 2015 <https://doi.org/10.4000/hrc.953>

LAMBERT Dominique. « L'Action de Maurice Blondel. L'actualité de sa Critique du Réductionnisme » - *Revista Portuguesa de Filosofia*, vol. 76, no. 2/3, 2020, pp. 1075–90,
<https://www.jstor.org/stable/26922262>.

LAMBERT D, REZSOKAZY R, *Comment les pattes viennent au serpent ? Essai sur l'étonnante plasticité du vivant*, Paris, Flammarion, 2004.

LAMBERT Dominique, *Un atome d'univers : la vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Bruxelles, Belgique, Éditions Lessius, 2011.

LAMBERT Dominique, « $E=MC^2$ Pourquoi les mathématiques sont efficaces. », *La Recherche*, Mensuel 316, janvier 1999, p. p.48.

LAMBERT Dominique et Marc LECLERC, *Au cœur des sciences: une métaphysique rigoureuse*, Paris, Beauchesne, coll. « Bibliothèque des Archives de philosophie », nouv. sér., 60, 1996.

LARGEAULT Jean, « Méthode », Encyclopædia Universalis,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/methode/>

LARGEAULT Jean, « Description et explication » Encyclopédie Universalis
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/description-et-explication/>

LARGEAULT Jean, « Idéalisme », Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/idealisme/>

LARGEAULT Jean, BRUTER Claude, *Hasards, probabilités, inductions : petits écrits de circonstance*, Toulouse, France, Association des publications de l'Université de Toulouse, 1979.

LARGEAULT Jean, THOM, René, *Systèmes de la nature*, Paris, France, Vrin, 1985.

LAUDAN Larry, *La dynamique de la science*, Philip H. Miller (trad.), Bruxelles, Belgique, P. Mardaga, 1987.

LAUNOIS Pascale dir. « Nanosciences et nanotechnologies »

<https://www.cnrs.fr/comitenational/doc/rapport/2004/lesateliers/023-046-Chap2Nanosciences.pdf>

LAURENT Pierre, « L'univers aux grandes échelles : études de l'homogénéité cosmique et de l'énergie noire à partir des relevés de quasars BOSS et eBOSS », 2016.

LAVERGNE Didier, « Action et réaction, physiologie », *Encyclopédie Universalis*,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/action-et-reaction-physiologie/>

LAVERGNE Didier, « Cortex cérébral », *Encyclopédie Universalis*,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/cortex-cerebral/>

LAVERGNE Didier et Jean-Paul RENARD, « Clonage », *Encyclopédie Universalis*,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/clonage/>

LE BIHAN Baptiste, *Qu'est-ce que le temps ?*, Paris, France, Vrin, 2019.

LE BIHAN Denis, organisation, « Conférence débat et controverses L'importance de l'eau dans les systèmes biologiques », sur *Académie des sciences*, 31/03/09

https://www.academie-sciences.fr/archivage_site/activite/conf/debat_310309.pdf

LE LIONNAIS François (éd.), *Les grands courants de la pensée mathématique*, Paris, Hermann, 1998.

LE NOXAÏC Armand, *Les métamorphoses du vide*, Paris, Belin : Pour la science, 2004.

LACHIEZE-REY Marc (dir.) *L'espace physique entre mathématiques et philosophie*, Les Ulis, EDP sciences, coll. « Penser avec les sciences », 2006

LEBEL André, « La participation problématique des mathématiques à la dialectique », *Philosophiques*, vol. 37, n° 1, 2010, p. 163-167.

LECOINTRE Guillaume, LE GUYADER Hervé, VISSET Dominique, *Classification phylogénétique du vivant*, Paris, France, Belin, 2001.

LEGLU Dominique, « Birgitta Whaley : « Percer les secrets du vivant grâce à la biologie quantique », *Sciences et avenir*, 7/11/16

https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/plantes-et-vegetaux/birgitta-whaley-percer-les-secrets-du-vivant-grace-a-la-biologie-quantique_107763).

LEHN Jean-Marie, « La chimie : science et art de la matière », coll. « La courrier de l'unesco » 03/11 <https://fr.unesco.org/courier/yanvar-mart-2011-g/chimie-science-art-matiere>

LEIBNIZ Gottfried Wilhelm, *Discours de métaphysique*, Paris, France, Gallimard, 1995,

LELIONNAIS F., « Descartes et Einstein. », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 5, n° 2, 1952, p. 139 154.

LEMAITRE Georges, « L'hypothèse de l'Atome Primitif », *Journal publication du Laboratoire d'astronomie et de géodésie de l'univers de Louvain vol 12 ppD1-D19*,
<http://adsabs.harvard.edu/full/1949PLAGL..12D...1L>

LEMERY Cédric, « Qu'est-ce que la brisure de symétrie ? », sur *Le web pédagogique*,

LEON Jacques, *Enquête sur la nature de l'univers : voyage dans l'infiniment grand*, Paris, France, Ellipses, 2020.

LEOPOLD Aldo, *La conscience écologique*, Marseille, France, Éd. Wildproject, 2013.

LESNE Annick et Pierre Préfacier COLLET, *Méthodes de renormalisation : phénomènes critiques, chaos, structures fractales*, Paris, France, Eyrolles, 1996.

LEVY Pierre, « Le jeu de l'intelligence collective », *Sociétés*, n° 79, janvier 2003

LEVY LEBLOND JM, *Penser les mathématiques*, Paris, Seuil, 1982.

LEQUEUX James, « Découverte de l'expansion de l'univers », Encyclopédie Universalis,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-de-l-expansion-de-l-univers/>

LONGO Claudio et Enrico GIODANO, « La « spécificité » de la biologie : une comparaison avec la physique », *Tréma* [En ligne], 9-10 | 1996, <http://journals.openedition.org/trema/1976>

LOPES Ana, « La découverte des gluons a quarante ans. », CERN, 2019
<https://home.cern/fr/news/news/physics/four-decades-gluons>

LOTH Francois, « Philosophie et ingénierie : des apports réciproques in Ingénierie et responsabilités », sur *Techniques ingénieur*, 10 avril 2013
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/ingenierie-et-responsabilites-42598210/philosophie-et-ingenierie-des-apports-reciproques-ag1600/>

LOUVET Brice, « Assistez à la transformation d'une vie unicellulaire en une vie multicellulaire », sur *Science post*, 4/5/19
<https://sciencepost.fr/assistez-a-la-transformation-dune-vie-unicellulaire-en-une-vie-multicellulaire/>

LUMINET Jean-Pierre, *L'écume de l'espace-temps*, Paris, France, Odile Jacob, 2020.

LUMINET Jean-Pierre, « Trous noirs », Encyclopédie Universalis,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/trous-noirs/>

LUMINET Jean-Pierre et Marc LACHIEZE-REY, *De l'infini: horizons cosmiques, multivers et vide quantique*, Malakoff, France, Dunod, 2019.

LUMINET Jean-Pierre et Marc LACHIEZE-REY, *La physique et l'infini : un exposé pour comprendre, un essai pour réfléchir*, Paris, Flammarion, coll. « Dominos », n° 43, 1994

M

MAES Christian, « Espace-temps thermodynamique? », coll. « Philosophia Scientiæ », 15/10/11

<http://journals.openedition.org/philosophiascientiae/688>

MALHERBE Jean-François, *La responsabilité de la raison: hommage à Jean Ladrière à l'occasion de son 80e anniversaire*, Louvain-la-Neuve, Belgique, France, Éd. de l'Institut supérieur de philosophie, 2002.

MANUEL Michaël, « Phylogénie animale », Encyclopédie Universalis, s.d

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/phylogenie-animale/>

MARCHAL Hugues, « L'énergie noire et la matière noire : sous-titrage de deux épisodes de la série "How the Universe Works". Faculté de philosophie, arts et lettres, Université catholique de Louvain, 2020. Prom. : Lepage, Thierry. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:24010> »,

MASSION Jean, « Cervelet », Encyclopédie Universalis,

<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/cervelet/>

MATHIS Paul, *Biocène: comment le vivant a coconstruit la Terre*, Paris, Le Pommier, 2021.

MAUPERTUIS Pierre-Louis Moreau de, Robert TOURNIERES, Jean DAULLE, BUISSON Louis, *Œuvres de Mr. de Maupertuis. Nouvelle édition corrigée & augmentée. Tome premier*, Jean Marie Bruyset (éd.), A Lyon, chez Jean-Marie Bruyset, libraire, grande rue Merciere, au Soleil. M. DCC. LVI., France, 1756.

MAZURE Alain, LE BRUN Vincent, *Matières et antimatière : à la recherche de la matière perdue*, Paris, France, Dunod, 2009.

MAZURE Alain, Guy MATHEZ et Yannick MELLIER, *Chronique de l'espace-temps: du vide quantique à l'expansion cosmique*, Paris, France, Masson, 1994.

MAZZA Damiano, « Introduction à la théorie des catégories », Université de Paris 13

<https://lipn.univ-paris13.fr/~mazza/teaching/IntroCat.pdf>

MERLEAU-PONTY Maurice, *Le Visible et l'invisible ; Suivi de notes de travail*, Paris, Gallimard, 1973.

MERLEAU-PONTY Maurice, *L'oeil et l'esprit*, Paris, France, Gallimard, 1964.

MERLEAU-PONTY Maurice, *Signes*, Paris, Gallimard, 1960.

MERLE-BERAL Hélène, *L'immortalité biologique*, Paris, France, Odile Jacob, 2020.

MERLIN Francesca, *Le hasard et les sources de la variation biologique : analyse critique d'une notion multiple.*, IHPST, HAL, 2009.

MEYER Claude, « Les représentations mentales », *Communication*, vol. 21/01, coll. « Open Edition », 2001, p. p.9-31.

MEYER Thierry, « Des variables observées aux variables manipulées ». Bulletin de psychologie, Groupe d'étude de psychologie, 2002, la mesure en psychologie (dir. A. Flieller), La mesure en psychologie, 55 (6), pp.583-592. {halshs-00352821}.

MICHARD, R., « La matière interplanétaire », Havard, Journal L'Astronomie, 1957 Vol. 71, p.45

<http://adsabs.harvard.edu/full/1957LAstr..71...45M>

MICHON Hélène, « Les raisons du cœur » Revue des sciences philosophiques et théologiques, 2009/1 (Tome 93), p. 47-58. DOI : 10.3917/rspt.931.0047. », Cairn

<https://www.cairn.info/revue-des-sciences-philosophiques-et-theologiques-2009-1-page-47.htm>

MIKAC, S.M Ulam, Mathematics an Logic, New York, Dover, 1968.

MILET Jean, *Ontologie de la différence : une exploration du champ épistémologique*, Paris, Beauchesne, coll. « Prétentaine », 2006, 1 vol. 24 cm.

MINE Philippe et Benjamin HATTAB, *À la découverte de l'antimatière*, Paris, Ellipses, 2011.

MIQUEL Paul-Antoine, *Sur le concept de nature*, Paris, France, Hermann, 2015.

MISRAHI Robert, « Substance », Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/substance/>

Monneyer Francoise, (Coll.), *Infini des philosophes, infini des astronomes*, Paris, Belin, coll. Regards sur la science, 1995.

Monnin Alexandre, « Y a-t-il une « philosophie du Web? Compte-rendu », sur Implications philosophiques, 1er mai 2020

<https://www.implications-philosophiques.org/%EF%BB%BFy-a-t-il-une-philosophie-du-web-1-2/>

MONOD Jacques, *Le hasard et la nécessité : essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Paris, France, Éditions du Seuil, 1970.

MONSEL Juliette, *Thermodynamique quantique et optomécanique*, 21/10/19, Thèse

<http://www.theses.fr/2019GREAY051>

MONTMOLLIN Isabelle de, *La philosophie de Vladimir Jankélévitch : sources, sens, enjeux*, Paris, PUF, 2000.

MORANGE Michel, WOLFF Francis, WORMS Frédéric, CHANGEUX Jean-Pierre, *L'homme neuronal, trente ans après : dialogue avec Jean-Pierre Changeux*, Paris, France, Éditions Rue d'Ulm, 2016.

MORIN Edgar, « Un siècle de sagesse en trois leçons », *The Conversation*, 7/3/21

<https://theconversation.com/edgar-morin-un-siecle-de-sagesse-en-trois-lecons-163917>).

MORIN Edgar, *Relier les connaissances le défi du XXIe siècle*, Seuil, 1999.

MORIN Edgar, LE MOIGNE Jean-Louis, *L'intelligence de la complexité*, L'Harmattan, 1999.

MORIN Edgar, *La connaissance de la connaissance*, Tome III. Seuil, 1992.

MORIN Edgar, *La Vie de la vie, La Méthode*, Tome II. Seuil, 1980.

MORIN Edgar, *La Nature de la nature, La Méthode*, Tome I. Seuil, 1977.

MOULOUD Noël, « Intuition », Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/intuition/>

MOULOUD Noël (Coll.), « Modèle », Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/modele/>

Moscovici Serge, Buschini Fabrice, (dir.), *Les méthodes des sciences humaines*, PUF fondamental, 2003.

MURRAY JD, *Mathematical Biology*, Berlin, Springer, 1989. Chap.15 Animal Coat Patterns and other Applications of reactions Diffusion mechanisms, p.435-480.

MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE « Anatomie comparée », <https://www.mnhn.fr/fr/collections/ensembles-collections/vertebres/anatomie-comparee>).

MUKHERJEE Siddhartha, KALDY Pierre, *Il était une fois le gène*, Paris, Flammarion, 2017.

N

NACCACHE Lionel, *Le nouvel inconscient: Freud, Christophe Colomb des neurosciences*, Paris, France, Odile Jacob, 2009.

NADEAU Sylvain, « Les expériences d'Aspect », Université de Laval http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/pp/03epr/epr_3/epr_3.html

NAGEL Ernest, Newman James R., Gödel Kurt, Girard Jean-Yves, Jean-Baptiste Scherrer, *Le théorème de Gödel*, Paris, Editions du Seuil, 1989.

NAU Jean-Yves, « Le premier embryon humain transgénique a vu le jour aux Etats-Unis » *Revue médicale Suisse*, 2008; volume 4. 1291-1291
<https://www.revmed.ch/RMS/2008/RMS-158/Le-premier-embryon-humain-transgenique-a-vu-le-jour-aux-Etats-Unis>

NAZE Yaël et Jean-Pierre Préfacier LUMINET, *Les couleurs de l'Univers*, Paris, Belin, Pour la science, 2005.

NEEMAN A, *Algebraic and Analytic Geometry*, Cambridge University Press, 2007.

NEF Frédéric, Schmitt Yann, *Ontologie: identité, structure et métaontologie*. Textes réunis, Paris, Vrin, 2017.

NEF Frédéric, *La force du vide : essai de métaphysique*, Paris, France, Éditions du Seuil, 2011.

NEF Frédéric, *Traité d'ontologie pour les non-philosophes (et les philosophes)*, Paris, France, Gallimard, 2009,

NEF Frédéric, « Ontologie de l'objet, théorie des propriétés et théorie des ensembles : quelques problèmes et perspectives », *Revue internationale de philosophie*, n° 236, n° 2, 2006, p. 181-207.

NEF Frédéric, *Qu'est-ce que la métaphysique ?*, Paris, France, Gallimard, 2004.

NEUKIRCH Jürgen, SCHMIDT Alexander, WINGBERG Kay, *Cohomology of Number Fields*, Berlin, Heidelberg, Allemagne, Springer Berlin Heidelberg, 2008.

NEWTON Isaac, Le Tonnelier de Breteuil DU CHATELET Gabrielle-Émilie, VOLTAIRE, *Principia: principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Paris, Dunod, 2006.

NORMAND Claudine, « Faut-il se demander ce que parler veut dire ? », *Persée*, 1980
https://www.persee.fr/doc/linx_0246-8743_1980_num_3_1_942

O

OBSERVATOIRE DE PARIS, « Le continuum espace-temps de l'univers »

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_relats-gene/impression.html

OBSERVATOIRE DE PARIS, « Résumé : les ères cosmologiques »,

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_univ-debut/resume.html).

ODIN Gilles Serge, « Stratigraphie », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/stratigraphie/>

OLIVIER DE SARDAN Jean-Pierre, *La rigueur du qualitatif : les contraintes empiriques de l'interprétation socio-anthropologique*, Louvain-La-Neuve, Academia-Bruylant, 2008.

OMNES Roland, *La révélation des lois de la nature*, Paris, Odile Jacob, 2008.

OMNES Roland, *Alors l'un devint deux : la question du réalisme en physique et en philosophie des mathématiques*, Paris, Flammarion, 2002.

OMNES Roland, *L'Univers et ses métamorphoses*, Paris, France, Hermann, 1973.

OMNES Roland, « Physique - les fondements et les méthodes »

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/physique-les-fondements-et-les-methodes/2-la-methode-en-physique/>

OMONT Alain, *À l'orée du cosmos: un siècle de révolution dans l'astronomie*, Les Ulis, EDP Sciences, 2017.

ORTIGUES Edmond, « Empirisme », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/empirisme/>

P

PANACCIO Claude, *Qu'est-ce qu'un concept ?*, Paris, J. Vrin, 2011.

PARROCHIA. D, MICALI A, ANGLES P, *L'unification des mathématiques, Algèbres géométriques, géométrie algébrique, et philosophie de Langlands*, Paris, Hermès-Science, 2012.

PARODI Maxime, *L'acte réfléchi, ou comment modéliser la faculté de juger en sciences sociales*, Sciences Po, 2008.

PASCAL Blaise, *L'homme est un roseau pensant : Pensées (liasses I-XV)*, Michel Le Guern Paris, Gallimard, 2016.

PATY Michel, « La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique », 2001 halshs-00187906, version 1 <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00187906> ;

PATY Michel, *Cosmologie et matière quantique : convergences conceptuelles*, 2000, p.219 249. halshs-00185022 <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00185022/document>

PATY Michel, « Formalisme et interprétation physique chez Schrödinger », *Frontières*, p.161 190, 1993. halshs-00167126 ,

PATY Michel, « Interprétations et significations en physique quantique », *Revue Internationale de Philosophie*, n°212, 2 (juin) 2000, 199-242.

PATY Michel, « Einstein et la pensée de Newton. », *La Pensée*, Fondation Gabriel Péri, 1987, p. 17
37. halshs-00177336

PATY Michel, *Einstein philosophe : La physique comme pratique philosophique*, PUF, 1993.

PAUL Thierry, BENOIST Jocelyn, *Le presque: enjeux croisés mathématique-philosophie*, Paris, Hermann, 2015.

PAVEL Ilarion, « La prédiction de l'antimatière par Dirac », *Bibnum Physique*, 1^{er}/06/ 11
<http://journals.openedition.org/bibnum/809>).

PECH Pierre, « Géomorphologie », *Encyclopédie Universalis*
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/geomorphologie/>

PEGNY Maël, *Sur les limites empiriques du calcul : calculabilité, complexité et physique*, thesis, Theses.fr, 2013.

PELLUCHON Corine, *Les Lumières à l'âge du vivant*, Paris, Seuil, 2021.

PELLUCHON Corine, « Manifeste animaliste. Politiser la cause animale. » *Alma*, pp.111,
hal-01532504, HAL, 2017: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01532504>

PENROSE Roger, HAWKING Stephen, *Les deux infinis et l'esprit humain*, Roland Omnès (trad.), Paris, France, Flammarion, 2011.

PENROSE Roger, LAROCHE Céline, *À la découverte des lois de l'univers : la prodigieuse histoire des mathématiques et de la physique*, Paris, Odile Jacob, 2007.

PERDIJON Jean, *Histoire de la physique*, Paris, Dunod, 2008.

PERFETTINI Jean-Luc, « Morts cellulaires », *Encyclopédie Universalis*,
<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/morts-cellulaires/>

PERREAU Laurent (éd.), *Le phénomène*, Paris, Vrin, 2014.

PETER Patrick, UZAN Jean-Philippe, Thibault DAMOUR, *Cosmologie primordiale*, Paris, Belin, 2012.

PETITOT Jean, « Philosophie transcendantale et objectivité physique », *Revue Philosophiques*,
Volume 24, numéro 2, automne 1997, p. 367–388

PETITOT Jean, « Forme », *Encyclopédie Universalis*,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/forme/>

PETROFF André, « L'autre Saussure », *Semen*, 2 | 1985 », 21 août 2007
<https://journals.openedition.org/semen/4281?gathStatIcon=true&lang=fr#quotation>

PETROPOULOS Marios, « Histoire de la théorie des cordes Des hadrons à l'échelle de Planck », *Reflets de la Physique* n° 22,
<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2010/05/refdp201022p8.pdf>

PIAGET Jean, « Les ambitions de la psychologie philosophique », dans : , *Sagesse et illusions de la philosophie*. sous la direction de PIAGET Jean. Paris cedex 14, Presses Universitaires de

France, « Quadriga », 1992, p. 166-222. URL : <https://www-cairn-info.ezproxy.u-paris.fr/9782130443735-page-166.htm>

PICARD Marguerite et Deniser ZICKLER, « Méiose », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/meiose/>

PIGENET Yaroslav, « Un Univers sans matière noire? », 4/06/18

<https://lejournel.cnrs.fr/articles/un-univers-sans-matiere-noire-0>

PINCHARD Alexis, « Méthode des hypothèses et usage cosmologique des Formes dans le Parménide de Platon », *Études platoniciennes*, n° 15, 15/05/19

DOI : [10.4000/etudesplatoniciennes.1668](https://doi.org/10.4000/etudesplatoniciennes.1668)

PIRE Bernard, « Boson de Higgs », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/boson-de-higgs/>

PIRE Bernard, « Champs théorie des » Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/theorie-des-champs/>

PIRE Bernard, « Découverte des bosons W et Z », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/decouverte-des-bosons-w-et-z/>

PIRE Bernard, « Mécanisme de Higgs », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/recherche/q/mecanisme%20de%20higgs/>

PIRE Bernard, « Interactions (physique) - interaction électrofaible », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/mecanisme-de-higgs/>

PIRE Bernard, « Isospin », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/isospin/>

PIRE Bernard, « Planck constante de ou quantum d'action », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/planck-quantum-d-action/>

PIRE Bernard, « Stabilité structurelle et morphogénèse (R. Thom) », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/stabilite-structurelle-et-morphogenese/>

PIRE Bernard, « Formulation de l'électrodynamique quantique », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/formulation-de-l-electrodynamique-quantique/>

PLATON, *Œuvres complètes*, Luc Brisson (trad.), Paris, Flammarion, 2008.

PLATON, COUSIN Victor, « *Timée* », *édition intégrale et annotée*, Printed in Poland, sans lieu, Amazon Fulfillment, 2010.

POINAT Sébastien, BENOIST Jocelyn, *Mécanique quantique: du formalisme mathématique au concept philosophique*, Paris, Hermann, 2014.

POINCARÉ Henri, *La Valeur de la science*, Paris, France, Flammarion, 1906.

PONCHARAL Bruno, « Ce qu'enseigne la traduction à la philosophie sur la question du « sens » », *Noesis*, n° 21, 1^{er}/06/13, p. 19-42.

POPPER Karl Raimund, *Conjectures et réfutations: la croissance du savoir scientifique*,

Michelle-Irène Brudny et Marc Buhot de Launay (trad.), Paris, France, Payot, 2006.

POPPER Karl Raimund *La connaissance objective*, Paris, France, Aubier, 1991.

POULIZAC Jean-Alain, *La variabilité génétique*, Paris, France, Ellipses, 1999.

POUIVET Roger, « Après le matérialisme ? », La Vie des idées, 2019
<https://laviedesidees.fr/Apres-le-materialisme.html>

PREVOST Bertrand, « L'élégance animale. Esthétique et zoologie selon Adolf Portmann », Images
 Revues 6 | 2009, DOI : <https://doi.org/10.4000>

PRIGOGINE Ilya, *Physique, temps et devenir*, Paris, Masson, 1982.

PRIGOGINE Ilya, *Temps à devenir : à propos de l'histoire du temps* - Présentation des presses
 du réel, Genève, Suisse, Clinamen, 2016.

PRIGOGINE Ilya, *La fin des certitudes : temps, chaos et les lois de la nature*, Paris, Odile Jacob,
 2009.

PRIGOGINE Ilya, STENGERS Isabelle, *Entre le temps et l'éternité*, Paris, Fayard, 1992.

PRIGOGINE Ilya, STENGERS Isabelle, *La nouvelle alliance : métamorphose de la science*, Paris,
 Gallimard, 1980.

PRIGOGINE Ilya, SULLIVAN Françoise, CHANU Jacques, *Physique, temps et devenir*, Revue
 Philosophique de la France et de l'Étranger, Paris, 1982.

PRUM B, « Des mathématiques dans nos cellules ? Partie 2 », sur Images des maths CNRS, 28
 octobre 2009 (en ligne : <https://images.math.cnrs.fr/Des-mathematiques-dans-nos-cellules-Partie-2>)

PUECH Michel, « Pour une notion philosophiquement acceptable de loi en théorie de la
 connaissance », Le Portique. Revue de philosophie et de sciences humaines, n° 15, 1^{er}/01/05
<http://journals.openedition.org/leportique/593>

PURVES Det al., *Neurosciences*, Bruxelles, Belgique, De Boeck Supérieur, 2019.

PUTOIS Oliver (coll.), *La conscience*, Flammarion, 2013.

Q

QUEMENER Soazig et François AUBEL, *La dictature des vertueux. Pourquoi le moralement
 correct est devenu la nouvelle religion du monde ?*, Buchet-Chastel, 2022.

R

RABOUIN David, « Infini mathématique et infini métaphysique : d'un bon usage de Leibniz pour
 lire Cues », Revue de métaphysique et de morale, Cairn, 2011
<https://www.cairn.info/revue-de-metaphysique-et-de-morale-2011-2-page-203.htm#>

RABOURDIN Sabine, *Local thematic styles: physicists' culture and their interpretation of reality. :
 A comparative study of Indian and French physicists around the interpretation of quantum*

Mechanics, thesis, Le serveur TEL (thèses-en-ligne), 2016.

RABUT Olivier, « Une philosophie naturelle des scientifiques ? Jacques Monod : «Le Hasard et la Nécessité» », *Revue Théologique de Louvain*, vol. 2, n° 2, Persée , 1971, p. 191-201.

RAY-GALLET Dominique, (Coll.) « Variations sur le thème du « code histone » », *Médecine Sciences, Med Sci (Paris)* 2005; 21, 4 avril 2005, p. 384-389.

RETORE Christian, *Logique mathématique et linguistique formelle*, HAL INRIA, 2013.

REUTER Yves, COHEN-AZRIA Cora, DAUNAY Bertrand, « Noosphère » dans *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. sous la direction de Reuter Yves, Cohen-Azria Cora, Daunay Bertrand et al. Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur, « Hors collection », 2013, p. 143-146. », *Cairn*,

REVOL Fabien, SOUCHARD Bertrand, *Réel voilé et cosmos théophanique : le regard de l'homme sur la nature et la question de Dieu*, Paris, Vrin, 2015.

RICHARD Sébastien (dir.), *Analyse et ontologie: le renouveau de la métaphysique dans la tradition analytique*, Paris, Vrin, 2010.

RICOEUR Paul, « Ontologie », *Encyclopédie Universalis*,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/ontologie/>

RICOEUR Paul, *Soi-même comme un autre*, Seuil, 1996

ROBERT Franck, « Science et ontologie : Pour un concept renouvelé de nature », *Archives de Philosophie* 2006/1(Tome 69), pp. 101 à 122
<https://www.cairn.info/revue-archives-de-philosophie.htm>

ROBERT Jérôme et Guy Préfacier OURISSON, *Dictionnaire de physique et de chimie*, Paris, Nathan, 2005.

ROBERT Paul, Josette REY-DEBOVE et Alain REY, *Le nouveau petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Paris, Dictionnaires Le Robert, 1997,

ROSNAY Joël de, *La symphonie du vivant : comment l'épigénétique va changer votre vie*, Paris, LLL, les Liens qui libèrent, 2018.

ROSNAY Joël de, *Je cherche à comprendre : Les codes cachés de la nature*, Paris, LLL, 2016.

ROULOIS P, « Les bases en neuropédagogie et neuroéducation », dans *Neuropédagogie*, 2010 (en ligne : <https://neuropedagogie.com/bases-neuropedagogie-neuroeducation/la-chimie-du-cerveau.html>)

ROUX Jeanne-Marie, *Les degrés du silence : de la juste place du sens dans le langage et dans la perception chez Austin et Merleau-Ponty*, Thèse de doctorat, France, Université Paris 1, 2015.

ROUX Sophie, *La philosophie mécanique (1630-1690)*, Paris, EHESS, 1996.

ROVELLI Carlo, LEM Sophie, *L'ordre du temps*, Paris, Flammarion, 2019.

ROVELLI R, *Qu'est-ce que le temps ? Qu'est-ce que l'espace ?*, Paris, Bernard Gilson, 2006.

RUPHY Stéphanie, « *Scientific pluralism reconsidered: a new approach to the (dis)unity of Science* », University of Pittsburg Press, 2016.

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

RUPHY Stéphanie, « Unité ou pluralité des sciences, nouvelles questions, nouveaux enjeux. », Université Paris Saclay

<http://www.centre-dalembert.universite-paris-saclay.fr/wp-content/uploads/2013/10/diaporama-s.-ruphy.pdf>

RYANOVA Iva, « La physique de la longévité », 22/01/18

<https://home.cern/fr/news/news/detectors/long-lived-physics>

RYDER Guy, « Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017: Les eaux usées: une ressource inexploitée » Unesco

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247551>

S

SACHSE Christian, « L'évolution biologique, un trésor de philosophie. Vers une nouvelle symbiose entre science et métaphysique », EPFL, 2021.

SACQUIN Yves et Laurent HILICO, « Pourquoi et comment peser l'antimatière ? », *Reflets de la Physique* n°65

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2020/02/refdp202065p12.pdf>

DE SAINT SIMON Michel, « Spectroscopie », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/spectroscopie/>

SAINT-OURS Alexis de, « La disparition du temps en gravitation quantique », *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, n° 15-3, 1^{er} octobre 2011, p. 177-196.

SALANSKIS Jean-Michel, « La littérature entre axiomatique et formalisme », *Les Temps Modernes*, 2013/5 (n° 676), p. 178-197.

<https://www.cairn.info/revue-les-temps-modernes-2013-5-page-178.htm>

SALANSKIS Jean-Michel, « Continu et discret », Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/continu-et-discret/2-investissement-philosophique-de-l-opposition/>

SALANSKIS Jean-Michel, « Épistémologie de la mathématique », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/epistemologie-de-la-mathematique/>

SALANSKY Jean-Michel, « La preuve en mathématiques », Encyclopédie Universalis,

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/preuve-mathematiques/>

SALANSKIS Jean-Michel, « L'herméneutique formelle », CNRS, Paris, 1991

SANCHEZ Norma G., « Unification conceptuelle des particules élémentaires, trous noirs et les états

primordiaux de l'univers », Observatoire de Paris, 1^{er} 01/04

https://www.observatoiredeparis.psl.eu/IMG/article_PDF/Unification-conceptuelle-des_a2247.pdf).

SANCHEZ Norma G., « Conceptual unification of elementary particles, black holes, quantum de Sitter and Anti de Sitter string states », ARXIV, 2018

<https://arxiv.org/abs/hep-th/0312018>).

SANCHEZ Norma, « Évaporation des trous noirs et théorie des cordes », Observatoire de Paris, 24/02/13

<https://www.observatoiredeparis.psl.eu/evaporation-des-trous-noirs-et-theorie-des-cordes.html>

SARTENAER Olivier, *Qu'est-ce que l'émergence ?*, Paris, Vrin, 2018.

SARTENAER Olivier, « Compte rendu du livre Pluralismes scientifiques. Enjeux épistémiques et métaphysiques. » *Revue Philosophique de Louvain*. Troisième série, tome 112, n°4, pp. 774-778., Persée, 2014.

SAUVAGE Marc, « Le rayonnement thermique en astrophysique. », *Photoniques*, n° 105,

<https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2020/06/photon2020105p41.pdf>

SAUVE. D, "Signification et états mentaux : à propos de l'« antireprésentationnalisme » de Wittgenstein", *Erudit*, Volume 25, Number 1, printemps 1998, (en ligne :

<https://www.erudit.org/fr/revues/philoso/1998-v25-n1-philoso1806/027470ar/>)

SHANNON C E et al., *La théorie mathématique de la communication*, Paris, France, Cassini, 2018

SCHATZMAN Évy, *L'expansion de l'univers*, Paris, Hachette, 1989.

SCHEIDECKER-CHEVALLIER Myriam, « La mathématisation de la chimie au cours de son histoire », IREM, 1999, <https://numerisation.univ-irem.fr/WR/IWR99024/IWR99024.pdf>).

SCHLICK Moritz, *General theory of knowledge*, Albert E. Blumberg (trad.), LaSalle (Ill.), Etats Unis d'Amérique, Open Court Pub., 1985.

SCHLICK Moritz et Delphine CHAPUIS-SCHMITZ, *Forme et contenu*, Marseille, Agone, 2016.

SCHNELL Alexander, *Qu'est-ce que le phénomène ?* Paris, Vrin, 2014.

SCHOPENHAUER Arthur, *Le monde comme volonté et représentation*, Paris, Gallimard, 2009.

SCHRÖDINGER Erwin, *L'esprit et la matière*, coll. Points-Sciences, Seuil, 2011.

SCHRÖDINGER Erwin, *Physique quantique et représentation du monde*, Paris, Seuil, 1992.

SEGAL Jérôme, *Le zéro et le un*, Éditions Matériologiques, 2011.

SELOSSE Marc-André, JOYARD Jacques, « Symbiose et évolution : à l'origine de la cellule eucaryote », *Encyclopédie environnement*, 17/04/21

<https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/symbiose-evolution-lorigine-de-cellule-eucaryote/>

SENGUPTA Piali et D.T. ARAVINTHAN Samuel, « C. elegans: a model system for systems neuroscience », National Center for Biotechnology Information, 4/11/09

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2904967/>

SEON Thomas, *Les lois d'échelle : la physique du petit et du grand*, Paris, Odile Jacob, 2018.

SERGIESCO Viorel, « Champ, physique », Encyclopédie Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/champ-physique/>

SHANNON Claude Elwood, *La théorie mathématique de la communication*, Paris, Cassini, 2018.

SIEGEL Ethan, « This Is Why Physicists Think String Theory Might Be Our “Theory Of Everything» *Forbes*, 31/05/18

<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/05/31/this-is-why-physicists-think-string-theory-might-be-our-theory-of-everything/?sh=37227ec258c2>

SILBERSTEIN Marc, *Matériaux philosophiques et scientifiques pour un matérialisme contemporain: Sciences, ontologie, épistémologie*, Bruxelles, Matériologiques, 2018.

SIMON Mathieu, « Système nerveux », *Cours de pharmacie*, 18/01/19

<https://www.cours-pharmacie.com/physiologie/systeme-nerveux.html>

SIMON-KOCH Marie-Pierre, « Qu'est-ce qu'un champ ? », *La revue lacanienne*, vol. 1, no. 1, 2008, pp. 93-97. <https://www.cairn.info/revue-la-revue-lacanienne-2008-1-page-93.htm>

SINACEUR Hourya, « Réalisme mathématique, réalisme logique chez Bolzano / Mathematical realism and logical realism in Bolzano's works », *Persée*, 1999

https://www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1999_num_52_3_1365#rhs_01514105_1999_num_52_3_T1_0474_0000

SINACEUR Hourya Benis, *Modernité mathématique : Quelques invariants épistémologiques*, 2002 <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01119544> ;

SMADJA Ivahn, *Réalisme et théories physiques*, Caen, Presses Universitaires de Caen, 2008.

SMERLAK Matteo, « Chapitre XI. La mécanique des trous noirs », dans : Matteo Smerlak, *Les trous noirs*. Paris cedex 14, PUF « Que sais-je ? », 2016, p. 96-100

<https://www.cairn.info/les-trous-noirs--9782130630098-page-96.htm>

SMOLIN Lee, *La renaissance du temps : pour en finir avec la crise de la physique*, Paris, Dunod, 2014.

SOLER Lena, « Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ? Des caractéristiques du modèle qui importent du point de vue de l'enseignement intégré de science et de technologie », *Spirale Revue de recherches en éducation*, vol. 52, n° 1, 2013, p. 177-214.

SOUCHARD Bertrand et Stéphane MOTTIN, *L'énergie d'Aristote à Einstein : un éternel recommencement*, Les Ulis, France, EDP Sciences, 2018.

SOULEZ Antonia, BLANCHÉ Robert, « Vérité », Encyclopædia Universalis,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/verite/>

SOULEZ Antonia et Arley Ramos MORENO, *La pensée de Gilles-Gaston Granger*, Paris, Hermann 2010.

SOUTIF Michel, « Physique - les moyens de l'expérimentation », s.d, Encyclopédie Universalis

SPAGNOU Pierre, *Le trésor des ondes gravitationnelles*, Paris, CNRS éditions, 2020.

STAHL Alain, *Science et philosophie : 3ème édition La Science permet-elle une présentation moderne des grandes questions philosophiques?*, Paris, Vrin, 2017.

STENGERS Isabelle, *Sciences et pouvoirs: faut-il en avoir peur ?* Bruxelles, Éd. Labor, 1997.

STEPHANE DUGOWSON, « Les topos de Grothendieck comme ponts mathématiques, par Olivia Caramello, <https://www.youtube.com/watch?v=hAegikLkFjA>

STEWART Ian, COURCELLE Oliver, *Les mathématiques du vivant: ou la Clé des mystères de l'existence*, Paris, France, Flammarion, 2016.

STOFFEL Jean-François, LADRIERE Jean, *Le phénoménalisme problématique de Pierre Duhem*, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2002.

STOPPA-LYONNET Dominique, LYONNET Stanislas, *Les 100 mots de la génétique*, Paris, PUF 2017.

STASSER C, *Conception d'une expérience bas-bruit pour la détection de transition neutron neutron caché et recherches de contraintes sur la proximité d'une brane cachée dans le bulk*, Thèse de doctorat en physique, Université de Namur, 29-10-21.

STRERI Arlette, « Perception tactile » Encyclopédie Universalis, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedia/perception-tactile/>

SUEUR Cédric, « L'animal n'est pas un objet, mais un agent moral », sur The Conversation, 2/2/22 https://theconversation.com/lanimal-nest-pas-un-objet-mais-un-agent-moral-174315?fbclid=IwAR2tKk89VheUuQW0O_s2FILBvobaTAU8WXXKQXqhHX-Q1zwm3fX0HjLujKxo

SUSSKIND Leonard, BAMBAGGI Jules, *Trous noirs: la guerre des savants*, Paris, Laffont, 2010.

SWARTZ Norman, *The concept of physical law*, Cambridge, 1985.

SYNCHROTRON SOLEIL, « Histoire de la lumière : Ondes et photons » <https://youtu.be/L5B3frVR8LM>

T

TAHKO Tuomas E, *An introduction to Metametaphysics*, Cambridge University Press, 2015.

TAILLET Richard, Loïc VILLAIN et Pascal FEBVRE, *Dictionnaire de physique*, De Boeck, 2018.

TAPPOLET Christine, *Émotions et valeurs*, PUF, 2000 <https://www.cairn.info/emotions-et-valeurs--9782130508427.htm>

TEGMARK Max, CLENET Benoît, *Notre univers mathématique: en quête de la nature ultime du réel*, Paris, Dunod, 2014.

TEILHARD DE CHARDIN Pierre, *Être plus*, Paris, Seuil, 1995.

TEILHARD DE CHARDIN Pierre, *Le milieu divin*, Paris, Seuil, 1957.

TEILHARD DE CHARDIN Pierre, *La place de l'homme dans la nature : le groupe zoologique humain*, Paris, France, Union générale d'éditions, 1962.

TERNAUX Jean-Pierre et François CLARAC, *Du neurone aux neurosciences cognitives : fondements, histoire et enjeux des recherches sur le cerveau*, Paris, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, 2015.

THOMAS Jean-Paul, « Réductionnisme » Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/reductionnisme-sciences/>

THOMAS Jean-Paul, « Théorie, sciences » Encyclopédie Universalis

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/theorie-sciences/3-les-theories-physiques-et-les-autres/>

TIERCELIN Claudine « La métaphysique et les sciences : Les nouveaux enjeux » In : *La métaphysique et les sciences : Les nouveaux enjeux* [en ligne]. Paris : Collège de France, 2014 (généré le 14 avril 2022). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/cdf/3685>>.

ISBN : 9782722603417. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.cdf.3685>.

TRAUB Oren, « Décisions liées aux traitements médicaux », MSD,

<https://www.msdmanuals.com/fr/accueil/sujets-particuliers/processus-decisionnel-en-medicine/decisions-liees-aux-traitements-medicaux>

TRINH Xuan Thuan, *La plénitude du vide*, Paris, Albin Michel, 2016,

TRINH Xuan Thuan, *Désir d'infini : des chiffres, des univers et des hommes*, Paris, Gallimard, coll. « Folio », n° 594, 2014.

TRINH Xuan Thuan, *Le chaos et l'harmonie : la fabrication du réel*, Paris, Gallimard, 2000,

TRINH Xuan Thuan, DUBREUIL Catherine, *Petit dictionnaire amoureux du ciel et des étoiles*, Paris, Pocket, 2014,

TROUILLARD Jean, « Blondel Maurice - (1861-1949) », *Encyclopédie Universalis*,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/maurice-blondel/>

U

UNESCO « Définition de la culture par l'UNESCO », sur Confédération Suisse,

<https://www.bak.admin.ch/bak/fr/home/themes/definition-de-la-culture-par-l-unesco.html>).

UNESCO (éd.), « La pensée scientifique : quelques concepts, démarches et méthodes », Paris, 1978.

UNIVERSITE D'ANGERS, « Régulation du métabolisme : introduction »

<https://biochimej.univ-angers.fr/Page2/COURS/7RelStructFonction/2Biochimie/0IntroRegulMetab/1IntroRegulMetabol.htm>

UNIVERSITE DE GENEVE, « Les secrets de la méthylation de l'ADN », 2013

<https://www.unige.ch/communication/communiques/2013/cdp130618/>).

UNIVERSITE DE GENEVE, « Programmes anthropocentrique et écologique »,

Éthologie, 28/09/15 <http://ethologie.unige.ch/etho4.15/par.date/2015.09.28.htm>
 UNIVERSITE DE LAVAL « Symétrie CPT », sur Université de Physique Feynman,
http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/pp/10cpt/sym_fondamentales.html
 UNIVERSITE DE LAVAL, « Symétrie CP », sur Université de Physique Feynman,
http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/pp/10cpt/sym_cp.html
 UNIVERSITE DE LYON, « Une philosophie de la volonté et du désir »
http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2001.berjon_a&part=38718
 UZAN Jean-Philippe, *L'harmonie secrète de l'Univers*, Paris, Flammarion, 2019.
 UZAN Jean-Philippe, Bénédicte LECLERCQ et Françoise Préfacier COMBES, *De l'importance d'être une constante*, Paris, Dunod, 2005.

V

VAN EERSEL Patrice (Coll.), *Le monde s'est-il créé tout seul ?*, Paris, Librairie générale française, 2010.
 VAN FRAASSEN Bastiaan C., *The Empirical Stance*, Yale University Press, sans lieu, 2002.
 VAN FRAASSEN Bastiaan C., *The scientific image*, Oxford, Clarendon press, 1980.
 VANDERMEERSCH Bernard, « Homo sapiens sapiens », Encyclopédie Universalis,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/homo-sapiens-sapiens/>
 VARENNE Franck, *Histoire de la modélisation : quelques jalons*, Actes du colloque
 Modélisation succès et limites CNRS & Académie des technologies, Paris 6/12/16
 VARENNE Franck, *Théorie, réalité, modèle : épistémologie des théories et des modèles face au réalisme dans les sciences*, Paris, Éd. Matériologiques, 2012.
 VARENNE Franck, DUTREUIL Sébastien, HUNEMAN Philippe, SILBERSTEIN Marc, *Modéliser, simuler – Tome 2*, Paris, Matériologiques, 2016.
 VAUCLAIR Sylvie, *La naissance des éléments : du big bang à la Terre*, Paris, Odile Jacob, 2006.
 VENEZIANO Gabriele, « Théorie des cordes : Quelques applications. », Collège de France, 2011,
<https://www.college-de-france.fr/site/gabriele-veneziano/course-2010-2011.htm>
 VERLEY Jean-Luc, « Exponentielle et logarithme », Encyclopédie Universalis,
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/exponentielle-et-logarithme/2-logarithmes/>
 VERLEY Jean-Luc, ADDA Josette, BARDOS Claude, BRUNEL Antoine, *Dictionnaire des mathématiques. Algèbre, analyse, géométrie*, Paris, Albin Michel, 1997.
 VERLOES A (Coll.) « Lissencéphalies : aspects cliniques et génétiques », EM Consulte, 1^{er}/03/08
<https://www.em-consulte.com/article/105911/lissancephalies%C2%A0-aspects-cliniques-et-genetiques>
 VERNANT Jean-Pierre, « Raisons du mythe », dans : *Mythe et société en Grèce ancienne*. Sous la direction de Vernant Jean-Pierre. Paris, La Découverte, 2004, p. 201-258, Cairn,

<https://www.cairn.info/mythe-et-societe-en-grece-ancienne--9782707143259-page-201.htm>

VETO Miklos, « Le fondement selon Schelling. Une interprétation partielle », *Revue philosophique de Louvain*, Persée, 1972

https://www.persee.fr/doc/phlou_0035-3841_1972_num_70_7_5683

VIDAL-ROSSET Joseph, « Conceptualisme, philosophie », *Encyclopédie Universalis*,

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/conceptualisme-philosophie/>

VILLAIN Jacques, « Symétrie et théorie des groupes à travers la physique. », 2009, CEA, 18/06/09,

HAL <https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-00396043/document>

VOISIN Claire, « Géométrie algébrique », *Collège de France*,

<https://www.college-de-france.fr/site/claire-voisin/inaugural-lecture-2016-06-02-18h00.htm>

VOGEL Théodore, *Pour une théorie mécaniste renouvelée*, Henri Gauthier-Villars, 1973.

VOGEL Théodore, *Théorie des systèmes évolutifs*, Paris, Gauthier-Villars, 1965.

W

WARD Andrew, « The Gene: An Intimate History », by Siddhartha Mukherjee », *Financial Times*,

10/10/16 : <https://www.ft.com/content/a47d65a4-2cc4-11e6-bf8d-26294ad519fc>

WEBER Edouard-Henri, « Hylémorphisme », *Encyclopédie Universalis*

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/hylemorphisme/>

WEBER Michaël, « La méthylation de l'ADN, un acteur-clé de la pluripotence », *Médecine Sciences, Med Sci (Paris)* 2011; 27, 5 mai 2011, p. 483-485.

WHITEHEAD Alfred North, *Le concept de nature*, Paris, Vrin, 2006.

WHITEHEAD Alfred North, *Procès et réalité*, Gallimard, 1995.

WITTGENSTEIN, *Tractatus Logico-Philosophicus*, (trad p. Klossowski; intro B. Russell, notes A. Patri), Paris, Gallimard, 1961.

WOLFE Charles, *Le cerveau est un « livre qui se lit lui-même. Diderot, la plasticité et le matérialisme*, HAL, 2014, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01232641>

WOLFRAM S, *A New kind of science*, Wolfram, Média, 2022.

WOTLING Patrick (dir.), *La méthode*, Vrin, 2000.

X

Y

Z

ZEE A, *Vertigineuses symétries*, Paris, EDP Sciences, 2018.

ZEIDLER Eberhard, *Quantum field theory. II, Quantum electrodynamics: a bridge between*

mathematicians and physicists , Berlin, 2009.

ZINN-JUSTIN Jean, « Renormalisation et groupe de renormalisation : les infinis en physique microscopique contemporaine », Colloque de la société française de physique : « physique et interrogations fondamentales », 27/10/99

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/31/065/31065366.pdf>

ZWIRN Hervé, *Les systèmes complexes. Mathématiques et biologie*, Paris, Odile Jacob, 2006.

Liens consultés la dernière fois le : 10/04/22

ANNEXES

Annexe I. Les modèles et théories.

Dans notre thèse, nous utiliserons une notion de modèle issue des sciences formelles (nous verrons qu'il s'agit d'un ensemble d'objets intuitivement connus sur lesquels les axiomes d'un langage formel s'interprètent comme vrais, sont satisfaits). Mais, en science empirico-formelles (sciences de la nature) ou dans les sciences de l'ingénieur, la notion de modèle est différente. Cette notion s'identifie avec un ensemble d'équations et d'hypothèses décrivant des champs de phénomènes restreints (par le biais d'approximations, de simplifications, d'analogie structurale, ...). On parlera par exemple de modèle d'univers de Lemaître (1927) caractérisé par des équations d'Einstein envisagées dans l'hypothèse d'une géométrie spatiale sphérique (et plus généralement d'une métrique homogène et isotrope) et d'une évolution temporelle non limitée ni dans le passé, ni dans l'avenir. On se restreint donc à des situations particulières et à des approximations (car l'univers n'est pas à toutes les échelles homogène et isotrope !) ...

Par théorie, nous entendons des ensembles d'énoncés généraux fondés sur des principes (par exemple de symétrie...) visant à décrire de larges pans de la réalité empirique. Dans l'exemple ci-dessus, la relativité générale constitue une théorie, tandis que l'univers de Lemaître ou celui d'Einstein (1917) apparaissent comme des modèles.

Annexe II. Sur la connaissance

Il existe différentes manières de produire une connaissance, un ensemble d'énoncés cohérents-vérifiés-vrais : (1) en mathématiques, on se contente de produire par démonstration (à partir des axiomes) des ensembles d'énoncés non-contradictaires (la vérification = la démonstration ; la vérité = le fait qu'un énoncé formel soit satisfait dans un modèle : dans un ensemble d'objets intuitivement connus) (2) en physique, on aura une autre manière de connaître, car la méthode de vérification n'est pas la démonstration, mais l'observation ou l'expérimentation. (3) en histoire, on utilisera plutôt une méthode d'interprétation a posteriori (herméneutique) : interprétation a posteriori qui doit rester cohérente avec les données recueillies... La diversité des manières de connaître se rapporte à la diversité des méthodes de vérification, à la variété de rapports à la réalité (formelle, empiriques, ...) et au type de cohérence (le type de logique adoptée pour le rapport à la cohérence des énoncés).

Dans cette thèse, nous entendons par connaissance empirique, un ensemble d'énoncés cohérents (logiquement consistants, linguistiquement corrects, ...) vérifiés (selon des modes et standards appropriés à une discipline donnée) et ayant une prétention à la vérité (à une correspondance avec un élément de réalité : une altérité.)

Une connaissance formelle peut être vue comme un ensemble de théorèmes obtenu par déduction à partir d'axiomes dans un système formel consistant (le mode propre de « vérification » est ici la démonstration). Une notion de « vérité » d'une expression formelle s'identifie ici à celle de satisfaction de celle-ci dans un modèle de système formel.

Annexe III. Les tables de vérité.

Pour comprendre les schémas de la page 155 sur l'évolution des réseaux booléens, il est absolument indispensable de connaître les **tables de vérité**, qui permettent d'illustrer les constructions logiques. Chaque automate se comporte comme une table de vérité. Par exemple, les automates "I, II, III" : correspondent à l'opérateur logique de conjonction, $\wedge$ (ET) est un automate qui, quand il reçoit de ses voisins les informations, produit ces résultats : la multiplication.

1 et 1 il produit 1

1 et 0 il produit 0

0 et 1 il produit 0

0 et 0 il produit 0

L'automate "IV" correspond à l'opérateur logique de disjonction : $\vee$ (OU inclusif) qui, quand il reçoit de ses voisins les informations, produit une addition :

1 et 1 il produit 1

1 et 0 il produit 1

0 et 1 il produit 1

0 et 0 il produit 0

Fonctionnement :

1ère étape : On donne à chaque automate un état 1 ou 0 : c'est la configuration de départ.

Par exemple 13 (1101) : I est dans l'état 1, II est dans l'état 1, III est dans l'état 0, et IV est dans l'état 1.

2ème étape : chaque automate transmet son état aux automates qui sont reliés à lui :

Par exemple : I est relié à II et à IV.

Si je suis parti de (1101) : comment vont évoluer les états des automates ?

I va recevoir de II l'état 1 et de IV l'état 1 ; l'automate I qui était dans l'état 1 va maintenant recalculer son état à partir de ces informations venant de II et de IV. Comment ?

I est l'automate ET (^) s'il reçoit 1 de II et 1 de IV il va se mettre dans l'état 1

II va recevoir de I l'état 1 et de III l'état 0 il va recalculer son état : 1 ET 0 donne 0 (cfr table du ^)

III va recevoir de II l'état 1 et de IV l'état 1 il va recalculer son état : 1 ET 1 donne 1

IV va recevoir de I l'état 1 et de III l'état 0 il va recalculer son état : 1 OU 0 donne 1 (cfr table du v)

3ème étape : l'état "13" = (1101) a donc évolué vers (1011) = état "11" c'est ce qui est indiqué à droite sur le tableau et sur le dessin (espace des configurations) 13 -->11.

4ème étape : je repars de l'état "11" = (1011) et je recommence le même calcul :

I va recevoir de II l'état 0 et de IV l'état 1 ; l'automate I qui était dans l'état 1 va maintenant recalculer son état à partir de ces informations venant de II et de IV. Comment ?

I est l'automate ET (^) s'il reçoit 0 de II et 1 de IV il va se mettre dans l'état 0

II va recevoir de I l'état 1 et de III l'état 1 il va recalculer son état: 1 ET 1 donne 1 (cfr table du ^)

III va recevoir de II l'état 0 et de IV l'état 1 il va recalculer son état: 0 ET 1 donne 0

IV va recevoir de I l'état 1 et de III l'état 1 il va recalculer son état: 1 OU 1 donne 1 (cfr table du v) L'état "11" = (1011) a donc évolué vers (0101) = état "5" c'est ce qui est indiqué à droite sur le tableau et sur le dessin (espace des configurations) 11 -->5.

5ème étape : on recommence de la même façon avec l'état "5" = (0101)

I va recevoir de II l'état 1 et de IV l'état 1 ; l'automate I qui était dans l'état 0 va maintenant recalculer son état à partir de ces informations venant de II et de IV. Comment?

I est l'automate ET (^) s'il reçoit 1 de II et 1 de IV il va se mettre dans l'état 1

II va recevoir de I l'état 0 et de III l'état 0 il va recalculer son état: $0 \text{ ET } 0$ donne 0 (cfr table du $\wedge$)

III va recevoir de II l'état 1 et de IV l'état 1 il va recalculer son état: $1 \text{ ET } 1$ donne 1

IV va recevoir de I l'état 0 et de III l'état 0 il va recalculer son état: $0 \text{ OU } 0$ donne 0 (cfr table du $\vee$)

L'état "5" = (0101) a donc évolué vers (1010) = état "10" c'est ce qui est indiqué à droite sur le tableau et sur le dessin (espace des configurations) $5 \rightarrow 10$.

Ensuite, on voit que si l'on repart de "10", on évoluera vers "5" et ainsi de suite : on est tombé ici sur une boucle (un cycle ! il n'y a pas de reconnaissance d'image : il y a hésitation perpétuelle). Dans les deux autres dessins, celui du milieu et de droite, on a changé (au milieu) la connexion du réseau : I reçoit ses informations de III et de IV (et non plus de II et de IV)... ou la nature des automates (à droite) : II est un "OU $\vee$ " au lieu d'un "ET $\wedge$ ".

Annexe IV.

La synthèse des contre arguments sur une théorie ultime du tout.

1) Arguments formels.

Théorème d'incomplétude de Gödel : il existe des énoncés indécidables ou des énoncés qui s'interprètent comme vrais et qui sont indémontrables.

Théorie des modèles (théorème de Löwenheim-Skolem) : Toute théorie qui possède un modèle de cardinalité infinie possède toujours un ensemble de modèles de toutes les cardinalités. De manière intuitive, dès lors que j'ai écrit une théorie formelle du tout, il existe une infinité d'univers dont la théorie du tout est la description, univers tout à fait différents. La théorie du tout ne répond pas à la question de savoir pourquoi je suis dans tel univers et pas dans les autres. Elle n'est pas une théorie du tout ! En fait l'idée ici est de dire je peux décrire en détails tous les modèles d'une théorie, mais je ne peux décrire les raisons qui me feraient choisir un modèle plutôt qu'un autre (il n'y a ici aucun argument faisant intervenir la finalité). L'idée est que tous les modèles sont modèles d'une théorie et rien ne peut en privilégier un plutôt qu'un autre. Maintenant, je pourrais dire que je suis dans tel univers parce que c'est possible et c'est la contingence ! Eh bien, effectivement, si c'est une contingence, cela échappera à une théorie du tout basée sur la nécessité absolue !

Théorème de l'arrêt de Turing : Supposons que ma théorie du tout soit écrite sous la forme d'un algorithme. Elle doit être capable de répondre à toutes questions concernant le monde empirique (question qui se traduit comme des données sur lesquelles l'algorithme va opérer). Mais, il n'existe aucun algorithme général permettant pour chaque question de décider si la réponse sera fournie en temps fini. On ne peut assurer que la théorie du tout puisse répondre à toutes les questions. Ce n'est donc pas une théorie du tout.

Théorème de Grim : Si une théorie du tout existe véritablement, elle doit fournir l'ensemble de toutes les vérités. Or, Patrick Grim a prouvé que cet ensemble mène à une contradiction. Une théorie qui produirait toutes les vérités serait contradictoire. Si on veut rester cohérent, on ne peut accepter une théorie du tout en ce sens.

2) Arguments non-formels.

2.1 En physique :

La description physique se fonde sur des équations fondamentales et des conditions initiales et/ou aux frontières. Une théorie du tout devrait dériver ces conditions à partir du même formalisme que celui qui produit les équations fondamentales mais est-ce possible ? Les lois physiques font intervenir des paramètres, des constantes. Les lois ne permettent pas de dériver a priori les valeurs de ces paramètres et constantes. Une théorie du tout serait-elle capable de le faire sans devoir être elle-même dérivée d'une autre théorie (auquel cas, elle ne serait pas une théorie du tout !) ?

2.2. En biologie :

Une théorie du tout devrait réduire la biologie à la physique. Or, (argument de Kaufmann) les fonctions biologiques sont impréconcevables. Elles ne peuvent faire l'objet d'une prédiction, pas même probabiliste (car l'ensemble des possibles est beaucoup trop grand pour être conceptualisé et muni d'une mesure de probabilité). A ce propos, plusieurs ouvrages de Christian Sachse sont intéressants car ils proposent une objection. Pour simplifier l'idée, il s'agit d'utiliser des concepts de niveaux inférieurs aux fonctions, des sous-ensembles, afin de pouvoir trouver des modèles explicatifs similaires.

Cependant, il ne s'agit pas de renoncer à une explication par les fonctions, il s'agit d'ajouter un cadre théorique qui pose la question de l'origine des fonctions. L'explication de l'émergence de certaines fonctions se révèle impréconcevable. Autrement dit, ce qu'envisage le réductionnisme est légitime : on peut (et doit, car c'est intéressant, décrire les fonctions par des concepts de niveaux inférieurs. Mais l'origine de l'émergence de ces fonctions peut quant à elle rester impréconcevable.

Il ne faut pas confondre explication synchronique (ici et maintenant) avec une explication diachronique (historique). Une analogie peut être éclairante. Si on cherche à comprendre le fonctionnement du moteur d'une voiture, on aura intérêt à en comprendre toutes les composantes, les pièces. Mais cette analyse synchronique ne donnera pas une explication du pourquoi on a eu besoin d'inventer un moteur. L'histoire de l'automobile ne se confond pas avec la mécanique automobile, les deux étant importantes ! Le vivant est le produit d'une histoire liée à des bifurcations associées à des événements singuliers souvent uniques, contingents... Une théorie du tout fondée sur la nécessité formelle et l'universalité ne peut rendre compte du contingent du pur singulier. Ainsi, en particulier, une théorie du tout ne pourrait rendre compte a priori de l'histoire humaine (histoire politique, économique, individuelle ou collective).

3) Arguments épistémologiques.

La science se fonde sur des conditions de possibilité (au niveau de la pensée et du langage) : l'existence de la capacité d'affirmer, la référence à un existant au moins, des lois logiques minimales (non-contradiction). La science ne peut démontrer la nécessité du recours à ces conditions sans pétition de principe (c'est ce que montre Aristote dans sa métaphysique Livre Gamma Chapitre 4 : On ne peut par exemple démontrer la nécessité du recours à l'affirmation sans affirmer ! Une théorie du tout serait donc incapable d'auto-justifier ses conditions de possibilité. C'est ce qu'Eddington veut dire lorsqu'il affirmait : « La science explique la nature, mais qui explique la science ? »

Argument lié à la renormalisation : beaucoup de théories efficaces peuvent être vues comme des théories effectives obtenues à partir d'une classe de théories différentes décrivant une réalité fondamentale par une procédure de renormalisation qui fait disparaître des détails « fins », des variables irrelevantes.⁶⁶ On ne peut donc jamais, dans ce cas, identifier une théorie ultime plus fondamentale. C'est la notion de classe (d'universalité) de théories fondamentales qui seule a du sens.

⁶⁶ C'est un anglicisme « irrelevant variables » (il s'agit de variables (microscopiques) qui à une certaine échelle (macroscopique) ne deviennent plus pertinentes pour la description (macroscopique) d'un système. Par exemple la vitesse d'une molécule particulière dans un gaz est irrelevante (mais pas la vitesse moyenne de toutes les particules).

La science se construit par la pensée, si on cherche à réduire la pensée à une théorie ultime du tout fondée sur des constituants fondamentaux (« élémentarité »), il faut expliquer la manière dont s'est construite la structure conceptuelle de cette théorie... et on ne peut que retomber sur l'activité antécédente d'une pensée. Nous nous confrontons alors à un point obscur : L'origine de la pensée qui pense la pensée.

La question du « point obscur » reste encore dans les neurosciences. Par exemple, j'observe mon cerveau à l'aide d'une technique d'imagerie ; je vois sur mon écran des images se succéder, mais je ne vois pas la pensée, et je ne peux saisir encore moins sur cette image l'acte de penser qui a présidé à la pensée d'une expérience dont le but est de voir ma pensée !

Il se pourrait que tout soit réductible à des activations de neurones, mais je ne pourrais jamais me mettre dans une situation purement extérieure à moi-même, où je verrais en direct ma pensée en train de penser. C'est un peu comme dans le cas où j'essaierais de voir avec mes yeux ce qui se passe derrière ma tête. Tout n'est que tissu, mais mes yeux ne peuvent voir l'arrière de mon cou... c'est une tache aveugle ! La tache aveugle exprime simplement que je ne peux sortir de ma pensée pour voir ma pensée penser ! Je ne peux pas atteindre de manière parfaitement claire le fondement de l'acte de pensée, qu'elle soit entièrement neuronale ou non. Même, si tout est neuronal dans la pensée, je ne peux rendre parfaitement transparent ce qui rend possible la pensée qui pense que toute la pensée est neuronale ! Cette conclusion de réflexion ouvre sur un autre domaine : la philosophie de l'esprit.⁶⁷

4) Arguments philosophiques (plus faibles car dépendants de présupposés).

Si le réel est ontologiquement stratifié (comme le pense von Bertalanffy dans sa « Théorie générale des systèmes » : image du réel comme une tranche napolitaine !), alors il n'existe pas de théorie ultime qui permettrait de penser l'unité de toutes les strates (matière, vie, pensée...), qui sont relativement autonomes les unes par rapport aux autres, même si elles reposent les unes sur les autres.

Si la recherche du vrai fait intervenir des éléments liés aux valeurs ou aux conditionnements socio-historiques (comme le pense une socio-épistémologue, alors une théorie centrée

⁶⁷ A ce sujet, nous renvoyons vers les tomes I et II. de « Philosophie de l'esprit », Vrin, 2004.

exclusivement sur le vrai (la correspondance entre un cadre conceptuel et un réel) ne pourrait pas expliquer le tout. Pour expliquer le « tout », il faudrait aussi expliquer les motivations profondes de développement des projets de recherche et leur finalité, ce qui ne pourrait se faire en restant au seul niveau des sciences théoriques.

Annexe V. L'argument de Grim.

Nous nous inspirons ici de l'article de J.-P. Delahaye, « La logique de la perfection » *Mathématiques et mystères*, Paris, Belin/Pour la science, p.94. Nous allons adapter un théorème de Patrick Grim pour montrer qu'une théorie véritablement ultime du tout, est contradictoire.

Une TVU devrait produire toutes les vérités. Or, Grim montre que l'ensemble des toutes les vérités est contradictoire.

Comment ?

- 1) Soit V l'ensemble de toutes les vérités et $P(V)$ l'ensemble de tous les sous-ensembles de V . Par le théorème de Cantor-Bernstein : $\#V$ inférieur à $\#P(V)$ où $\#$ désigne le cardinal de l'ensemble (c'est-à-dire le nombre de ses éléments).⁶⁸
- 2) Soit v une vérité particulière (par exemple $1+1=2$). Pour toute partie E de V (donc pour tout élément de $P(V)$) on peut poser la question : « v est-il dans E ? » Si oui, on a une vérité (v est dans E). Si non, on a aussi une vérité (V n'est pas dans E). Donc à chaque partie E de V , à chaque élément $P(V)$, on peut associer au moins une vérité.

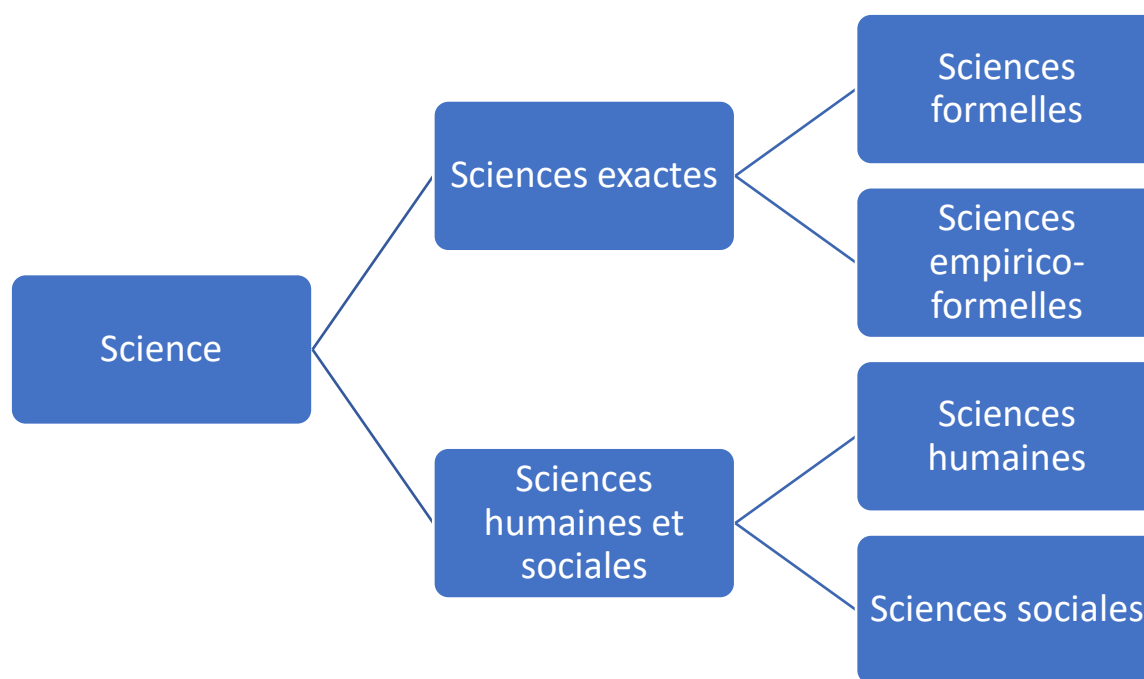
C'est-à-dire que le nombre d'éléments de V est au moins égal au nombre d'éléments de $P(V)$: en formules $\#P(V)$ inférieur ou égal à $\#V$.

68 cf. R. Rucker, *infinity, and the Mind. The science and philosophy of the Mind*, New-york, Bantam Books, 1983, p. 239-286.

Mais, ceci est contradictoire avec $\#V$ inférieur à $\#P(V)$. L'ensemble V mène donc à une contradiction et la TVU aussi ! Si l'on veut rester cohérent, on doit rejeter l'idée d'une TVU.

Pour conclure, cet argument interdit la constitution d'une théorie du tout vue comme l'ensemble de toutes les vérités formelles : « L'ensemble de toutes les vérités (formelles) implique une contradiction. Or la théorie du tout prétend renfermer toutes les vérités (formelles). Donc la théorie du tout implique une contradiction »

Annexe VI. La filiation entre la diversité des savoirs scientifiques



Science : méthode critique recourant à une diversité de modèles descriptif, explicatif et justificatif.

Sciences exactes : méthode utilisant une diversité de modes de justification fondés sur la démonstration, l'observation et l'expérimentation. Elles regroupent les sciences formelles et les sciences empirico-formelles.

Sciences formelles : disciplines regroupant une diversité de formalismes, validés par un modèle déductif cohérent (logique formelle, mathématiques).

Sciences empirico-formelles : disciplines décrivant une diversité de processus naturels selon un modèle hypothético-déductif, la théorisation, validée par une correspondance avec les observations.

Sciences humaines et sociales : méthode herméneutique, interprétation des faits en fonction d'une situation, contextualisation. Ces sciences peuvent, pour certains champs particuliers d'objets, utiliser les méthodes des sciences « exactes », mais beaucoup de phénomènes qu'elles abordent résistent à ces méthodes.

Sciences humaines : l'objet de recherche est la compréhension du fonctionnement du fait humain.

Sciences sociales : l'objet de recherche est la compréhension du fait social.

Annexe VII.

La diversité nécessaire des explications.

Dans cette thèse, nous avons surtout traité, en philosophie de la biologie, du point de vue d'un spécialiste des systèmes complexes, Stuart Kauffman, pour son apport sur l'imprédictible. Dans cette annexe, nous souhaitons aussi proposer une autre approche, celle de Christian Sachse, philosophe, épistémologue et historien des sciences spécialisé en biologie. Cette présentation permet de montrer la diversité de fondements en philosophie de la biologie. En effet, si Kauffman fonde son raisonnement sur l'impréconcevable diversité de fonctions, Sachse procède par une autre méthode de raisonnement. Il considère plusieurs manières de concevoir la notion de **fonction** à travers différents domaines de la biologie, amenant à la notion d'évolution, conduisant à s'interroger sur les conditions de cette évolution, et proposant, enfin, une téléologie naturaliste.

Le livre « *L'évolution biologique, un trésor de philosophie. Vers une nouvelle symbiose entre science et métaphysique.* » (Sachse 2021) est construit en vingt chapitres et quatre parties. Pour la première, l'auteur choisit un titre sur l'aspect « musculo-squelettique » du vivant, le second sur son fonctionnement cardiovasculaire, le troisième sur le système respiratoire et le dernier sur la reproductivité du vivant. Ces quatre spécificités du vivant sont reliées par un même fil d'ariane : les questions de l'émergence du vivant et des liens et différences entre sa diversité de formes. Pour une introduction à la philosophie de la biologie, nous renvoyons à un autre ouvrage de l'auteur : « *Philosophie de la biologie* », PPUR 2011. Nous ne présentons pas ici toute la richesse de la réflexion philosophique de ce livre, mais seulement ce qui est

potentiellement en lien avec notre thèse, mettant en lumière la diversité possible de choix de fondements dans la **construction des systèmes explicatifs**. La clôture explicative est relative au choix de causes (conditions d'émergence) et de finalité (justification téléologique). Ici, le modèle explicatif est naturaliste. Les conditions d'émergence du vivant sont microstructurelles, et la finalité de ses formes est relative à une limite naturelle reproductive : la frontière génétique.

Tout d'abord, nous apprenons que l'**étiologie**, qui étudie les causes des maladies, permet une description des « dispositions causales (...) manifestées », a fortiori. Cela signifie qu'elle est non prédictive, et qu'elle ne décrit pas tous les possibles, mais seulement l'effectivité observable. Or, Sache ne va pas insister sur cette impréconcevable diversité de fonctions, mais sur « une naturalisation de la dimension téléologique » de l'évolution biologique, car l'explication étiologique recourt au « passé causal évolutif. L'effet est expliqué par une disposition causale ». De plus, il souligne qu'elle permet d'« identifier les dysfonctions ». Ainsi, l'analyse fonctionnelle en étiologie est relative au dysfonctionnement. Ce qui pourrait se résumer au fait de dire qu'être en bonne santé, c'est ne pas avoir de maladies, de dysfonctionnements. La finalité (ou téléologie) de la fonction est alors tout simplement de fonctionner ! Mais comment apparaissent ces fonctionnements ?

Dans les chapitres suivants, il centre sa réflexion sur la philosophie de la **génétique**. La fonction n'est plus conçue en rapport au dysfonctionnement, mais à un effet observable : « La fonction d'une séquence ADN se base notamment sur son effet phénotypique c'est-à-dire sur un résultat qui est dans la majorité des cas visible à l'œil nu sur l'organisme. » Ainsi, deux manières de concevoir la fonction émergent et permettent de la définir de façon complémentaire : « Du pourquoi de l'approche étiologique au comment de celle systémique c'est un moyen dont nous disposons pour mieux exprimer la différence et le lien entre ces deux approches et leur possible de complémentarité. » Il distingue alors le fonctionnement de l'émergence.

Dans une **téléologie** naturaliste, on distingue les conditions de subsistance, ce qui permet au cœur de fonctionner, par exemple, des conditions d'émergence (comment il apparaît). Cela pose la question de la relation entre l'échelle micro et macro, d'une part, et la question de l'évolution du vivant, d'autre part. La notion de micro consiste à « analyser l'activité moléculaire ou biochimiques ». Le rapport entre micro et macro peut être compris soit, comme « l'ensemble des boucles causales entre les différents systèmes micro, soit sous la forme d'une boucle causale entre le système macro lui-même et ses différents systèmes micro ». Dans le second cas, le système macro est « une sorte de propriété émergente ». Ensuite, dans la troisième partie,

Sachse va donc insister sur les conditions initiales « nécessaires et suffisantes ». Mais, les conditions permettant l'émergence de la vie impliquent préalablement de définir la vie.

La **vie** peut être définie de différentes manières, selon les types d'approches. Et chaque définition possède ses limites, comme l'explique Sachse. Par exemple, la NASA la définit comme « un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne ». Mais, il n'existe « aucun organisme capable de s'auto maintenir de manière complètement isolé » de son environnement et d'autres organismes. De plus, les différences entre les « entités vivantes » viennent par « degré ». Alors, une autre définition, plus darwinienne, insiste davantage sur le caractère évolutif de la vie. Une autre définition, encore, est métabolique, centrée sur les échanges chimiques et l'autocatalyse, ou bien autopoïétique, considérant l'organisme comme unité. La définition de Barlett et Wong (2020) caractérise la vie par quatre processus particuliers: la dissipation, l'auto-catalyse (vitesse de la réaction chimique), l'homéostasie (stabilité de propriétés physiologiques) et l'apprentissage. Enfin, il est aussi possible de déterminer la vie plus abstraitement comme « un **système de boucles causales** ».

Dans la quatrième et dernière partie, Sachse, s'intéresse à la place d'une autre particularité du vivant : la **fonction reproductive**. Et, c'est par ce biais qu'il abordera enfin la phylogénie. La réponse phylogénétique à la question ontologique des espèces est celle d'un ancêtre commun. Ce modèle explicatif interroge donc sur les conditions de reproductivité et Sachse apporte un éclairage génétique sur ce point. Tout d'abord, l'auteur rappelle la conception pré-darwinienne, fixiste de l'espèce. Puis, l'originalité de son propos réside dans le fait qu'il souligne la potentielle influence de la physique sur cette idée d'invariance. Les espèces seraient comme des entités physiques, telles un proton, par exemple, fidèle à elles-mêmes. Ne dit-on pas familièrement que les chiens ne font pas des chats ?! Mais comment définir une espèce ? Avec l'idée d'**espèce**, dans une conception évolutionniste, il s'agit « d'identifier une continuité malgré du changement ». Dans ce sens, le réalisme structurel propose de se référer à la conservation d'un élément ou trait. En somme, il s'agit de définir ce qui relève du détail et ce qui est caractéristique, les « similarités pertinentes ». Alors, ceci ouvre à un « essentialisme causal », qui se base sur des propriétés elles-mêmes, justifiées par deux critères : « l'universalité et l'unicité ». Les propriétés renvoient aux « conditions nécessaires ». Le débat est alors déplacé sur la détermination des conditions nécessaires et suffisantes. Sachse, y répond d'un point de vue physique par le microstructuralisme.

Selon le **microstructuralisme**, toutes les occurrences (ou tous les membres) d'une espèce chimique partagent une microstructure, laquelle saurait alors caractéristique ». L'essence est

donc microstructurale. L'argument en faveur de cette position philosophique est qu'elle permet d'expliquer beaucoup de choses, comme la diversité des substances (eau, sucre ou café, pour reprendre l'exemple du livre). Cependant, comme le souligne justement l'auteur, le microstructuralisme pose des difficultés quand il s'agit de composé, ou phénomène complexe, dans le sens de « dynamique cohésive ». En effet, dire de quelles molécules nous sommes composés ne suffit pas à décrire le vivant ou l'humain. En vue d'une explication plus complète, il s'agirait d'identifier toutes les conditions, « le profil causal », qui dispose à ce type de complexité. L'explication microstructurale est alors un des éléments explicatifs, mais pas le seul. Il faudra, en l'occurrence, évoquer le milieu d'émergence, ou environnement, permettant à la complexité de se développer et de subsister. Une explication du **composé**, ou du complexe, est donc toujours **multifactoriel**. Alors, les trois derniers chapitres portent sur les « formes de cohésion ». Paradoxalement, dans le chapitre 17, la cohésion est abordée non par ce qui apporte la cohérence, mais, au contraire par la rupture, la limite, la discontinuité à travers l'exemple de la diversité bactérienne. Le phénomène de spéciation est bien entendu relatif à la transmission génétique, mais aussi à la sélection naturelle qui « dépend d'un contexte environnemental particulier ». Et, Cohan, cité par Sache, nomme « éco-type », « l'espèce résultante ». Mais alors, pourquoi les branches de l'arbre des espèces vivantes ne se croisent-elles pas ? Voilà la question dont traite le chapitre 18.

Les **arbres phylogénétiques** permettent de décrire les liens de parenté entre la diversité des espèces autour d'un ancêtre commun. Il ne décrit donc pas tous les facteurs d'évolution. Il est forcément réducteur. Par ailleurs, il est possible de construire d'autres représentations comme le propose Sachse : par populations, individus, cellules, ce qui rejoint, d'ailleurs, notre travail. L'un des problèmes de la description cladistique est qu'elle traite de la transmission verticale, et non potentiellement horizontale (échanges de gènes entre organismes différents) et de l'hybridation (descendants d'espèces différentes). Mais, d'autres types de représentation sont possibles et proposés, par exemple, par réseautage, et non pas par arborescence. La finalité de cette représentation n'est plus tant la parenté, que les « gènes de bases » partagées par toutes les souches de l'espèce ». La représentation en corail, comme la postulait déjà Darwin, permet qu'en elle de mettre en exergue les interconnexion et disparition d'espèces. Ce qui ressort de cette diversité de représentations, pour Sachse, est que la « connectivité globale (...) diminue dans le temps ». On peut supposer que cela est dû à la spécification des espèces, de plus en plus différenciable. Génétiquement, Sachse suppose que cela est dû au fait que les organismes échangent plus de gènes avec ceux qui sont proches, et moins avec ceux qui sont éloignés. Pour nous, du point de vue de la philosophie des sciences, cette diversité de représentations montre

que le choix topologique peut signifier le fondement de l'explication soit l'ancêtre commun, soit les gènes communs.

Ensuite, il est possible d'articuler ces deux explications en cherchant le rapport entre l'hypothèse d'avoir un ancêtre commun (même, similitude) et comprendre comment émerge la diversité génétique (variation). Alors, Sachse explique que la **proximité génétique** est une condition de reproduction et il poursuit dans le chapitre 19 sur « l'isolement reproductif ». Pour lui, « tout se base sur l'analyse des différences », plutôt que sur les similitudes.⁶⁹ Or, il est possible de réaliser une diversité de différenciations : génétique, physiologique, au niveau du mode de développement et du comportement. Ce qui questionne les modes de différenciation. Ces modes sont relatifs à la diversité d'objets observable (gène, organisme, individu...). L'isolement reproductif permet alors de mettre une limite pour déterminer un type d'objet, l'espèce, comme le propose Sachse, comme l'immunité est une manière de délimiter un organisme. Nous l'avons vu dans l'ouvrage philosophie du végétal. Il existe donc une diversité de processus naturels ayant chacun leur fonctionnement particulier. Cette limite donne la clôture épistémologique d'une explication, mais une diversité d'explications est nécessaire pour comprendre la réalité multifactorielle.

D'une part, l'apport essentiel de ce riche ouvrage de Sachse est donc la mise en lumière de la caractérisation de l'espèce par l'isolement reproductif, causée par la frontière génétique. Et ce modèle explicatif repose sur l'intégration de la notion de « dysfonction biologique », autrement dit, par l'examen de ce qui ne fonctionne pas. D'autre part, dans le vingtième et ultime chapitre, Sachse précise que la description d'espèces suppose la notion d'**individu**. Or, c'est également une notion qui ressort dans notre thèse. En outre, il souligne que la description d'espèces sous-tend aussi leur disparition, rapportant à la contingence traitée en particulier par Levine. La description de l'espèce, de la forme de vie, nécessite donc d'inclure les contingences (physiques, chimiques, géologiques), les processus particuliers du vivant (génétique, cellulaire, neuronaux) et ses caractéristiques, telle que la reproduction. Il s'agit donc de traiter des formes, mais aussi des modes de vie, ce qui ouvrirait sur l'ethnologie, la sociologie ou l'anthropologie, par exemple, et donc, sur une diversité de domaines, bien plus large que la physique ou la biologie, comme nous l'avons aussi expliqué dans notre thèse.

Ensuite, ce qui est intéressant dans la conclusion de ce chapitre et de ce livre est l'analyse de la notion de **loi de la nature** pour les domaines de la physique et de la biologie. Il rappelle qu'une loi est en général « une régularité universelle », ce qui exclut le vivant. Puis, il démontre qu'en

réalité, les lois de la physique sont conditionnelles, à l'instar du vivant. Il réussit donc un trait d'union conceptuel entre physique et biologie par l'introduction de la notion de **condition**, là où Kauffman a marqué la différence par la notion de **fonction**. Nous pouvons alors nous demander si par ce pont tout est explicable. Mais, à l'instar de Galois qui, en mathématiques démontra que toutes les équations n'étaient pas résolubles, c'est la notion de contingence qui à son tour est à sonder, et nous l'avons fait dans notre thèse.

Enfin, nous nous confrontons au fait que les lois physiques et les conditions d'existence biologique sont, mais qu'il n'est pas possible d'expliquer pourquoi la nature ne fonctionne pas autrement. De plus, il s'agit de définir tant **les conditions nécessaires**, ce qui permet l'émergence et la subsistance, que **les contingences**, ce qui peut changer. Or, les conditions des lois biologiques ne sont pas les mêmes que celles des lois physiques. Certes, elles ne se soustraient pas aux lois physiques, mais elles nécessitent des conditions supplémentaires. Ainsi, nous pourrions dire que les lois de la nature ne sont pas que les lois décrites uniquement par la physique, car on ne peut exclure celui qui pense ces lois et l'univers. Il s'agit donc aussi de décrire le vivant et l'humain, et, dans un souci de complétude, de couper le rêve d'unification par généralisation, en acceptant d'intégrer la notion d'individu. Nous comprenons les positions opposées qui la gomme, mais c'est exclure un pan entier des explications scientifiques qui ne se réduisent pas à la physique, en particulier les sciences cognitives, comme nous l'avons vu dans notre thèse. D'ailleurs, Sachse aboutit sur la question de la diversité d'évolutions (contingences, à ce propos, nous renvoyons à l'annexe sur le livre « *ontologie du devenir* »). L'évolution de la vie, dans l'évolution du cosmos, est peut-être un détail pour l'univers s'il pouvait penser, mais ce détail permet de penser l'univers qui le fait émerger.

Annexe VIII.

Une diversité des évolutions : prédictibilité et contingence.

Nous choisissons d'évoquer l'apport de l'ouvrage « *Ontologie du devenir* » de la philosophe et psychiatre Anne Fagot-Largeault, car il questionne la **diversité d'évolutions** : physique, biologique, psychique et même civilisationnelle, à l'instar de notre thèse, montrant qu'une unification de toutes les connaissances autour d'une théorie, ou d'un seul principe, n'est pas possible. L'évolution est mise en perspective de l'**histoire**, donc du passé, relative à une diversité d'évènements construisant sa narrativité. Or, il n'y a pas qu'une histoire dans l'univers. Même si les autres histoires dépendent de celle du cosmos, d'autres contraintes sont nécessaires à l'événementialité, et d'autres degrés de liberté, contingences, existent. Alors la question de la construction historique émerge. On peut s'interroger sur ce à quoi on peut attribuer le caractère d'**évènement**. L'évènement suggère quelque chose qui possède de l'importance. Or, ce qui importe a des grandes conséquences. Alors, le plus grand évènement est l'existence du cosmos, mais aussi celui de la vie. Or, la vie implique des individus. Dans ce livre, il est donc question de l'évolution du cosmos, et de sa connaissance avec l'apport de l'astrophysique, mais aussi de l'évolution de la vie, et de la question de l'**individuation**, en suivant notamment les traces du philosophe Gilbert Simondon (1924-1989). Enfin, l'ouvrage se termine, comme notre thèse, sur la question des possibles et la **téléologie de l'action humaine**.

Pour commencer, la notion même d'**évolution** est analysée. Depuis Aristote, la science décrit ce qui est stable, ce qui ne change pas. Alors, comme interroge Socrate, si tout change, la science est-elle possible ? Sur cette interrogation commence le livre « *Ontologie du devenir* », qui fait suite à des cours donnés au Collège de France. Si la science fut distinguée de l'histoire, car la première caractérisait ce qui est immuable par des lois alors que la seconde n'obéissait à aucune, deux visions du monde s'opposaient : l'une déterminée, permettant des prédictions, l'autre indéterminée, proposant des descriptions qu'a fortiori. Cependant, la science a elle-

même une histoire, et la séparation n'est plus nette avec la découverte d'une histoire du cosmos et de la vie. Alors comment définir ce qui est permanent et impermanent ?

L'incessante nouveauté est déjà évoquée par Héraclite, soulevant le problème du sens des mots et de leur rapport aux choses, soit ils sont conventionnels, soit ils correspondent au réel, appelant une « philosophie du langage ». Mais, la question sous-jacente à ce débat est : « Qu'est-ce qui est ? » Pour y répondre, il est possible, soit de remettre tout en question, comme le fait Descartes, soit de simplifier et de généraliser comme le fait Quine dans cette phrase : « une chose curieuse à propos du problème ontologique est sa simplicité. Il peut être formulé en trois mots : what is there ? (Qu'est-ce qu'il y a ?), et la réponse tient en un mot : Everything (Tout). » Mais, Quine ajoute que ce n'est pas si simple et distingue en particulier l'être réel de l'être imaginaire. De plus, une diversité d'ontologies est conceptualisable, par exemple, à partir de l'idée que ce qui est, est ce qui est là. Alors, il s'agit de caractériser ce qui est là avec des « attributs ». Dans ce sens, une ontologie du devenir est antinomique. Mais ce qui est là aujourd'hui, n'était pas là hier et ne sera pas là demain... Une ontologie présentiste de l'être-là n'est pas tenable, car tout passe, tout change. Nous faisons l'expérience de la finitude notamment par toutes les formes de deuil, de séparation. Alors, comment penser « une ontologie mouvante » ?

Selon la philosophie grecque, « les types demeurent ». Il est donc possible d'établir un ordre. Mais, dans le premier chapitre, le mobilisme universel est présenté avec ses difficultés conceptuelles, telles que la distinction entre les choses et l'origine. Alors, deux thèses s'opposent soit l'affirmation parménidienne que l'être est « un, immuable », soit celle de l'« être fluide », évoqué notamment par Héraclite, Lucrèce ou Montaigne. Cette seconde thèse invite au « scepticisme », alors qu'une autre voie est proposée par l'identification des « mêmes et non mêmes », déjà dans le corpus hippocratique. Cette diversité observable, notamment par la science expérimentale, invite à « comprendre toutes les variétés dans une unité typique », du particulier au général, même s'il existe une insaisissabilité par la créativité même du vivant, comme le souligne déjà Claude Bernard.

Par ailleurs, ce chapitre rappelle que la philosophie occidentale n'est pas la seule à penser la mobilité. Dans la philosophie orientale la notion de Dao, signifiant cet écoulement dans le réel, fonde même le taoïsme. Une réponse face à la difficulté logique de concevoir que tout est dans tout consiste à postuler que l'espace-temps est « une caractéristique de l'appareil cognitif du sujet connaissant », comme le fait Kant. Une autre consiste à décrire par forme, simplification numérique ou géométrique, selon la voie pythagoricienne et platonicienne, au risque de

l'idéalisme. Un autre chemin consiste encore à concevoir les choses par « la combinaison et la séparation », comme le suggère Anaxagore, c'est « l'intuition des matérialistes. », c'est aussi le chemin que nous avons suivi dans notre thèse, en montrant cependant les apories du matérialisme (dans une annexe, nous préciserons ses diverses formes). Ainsi, deux directions s'opposent : l'**idéalisat**ion des choses par des formes ou la déconstruction jusqu'à l'élémentarité, l'atomisme, le **matérialisme**. Mais comment savoir si la réalité est telle que nous la percevons ou s'il s'agit de représentation comme le suggère Schopenhauer ?

Selon le philosophe Imamichi, le sujet est immergé dans le réel. Or, il n'est pas possible de concevoir la totalité quand on est dans cette totalité. Par exemple, reprenons la métaphore einsteinienne du train. On a l'impression que le train ne bouge pas. Le mouvement est relatif, en fonction du positionnement. Pourtant, il y a bien un avant et un après. Il faut que je naisse pour mourir. Dans ce qui existe, il y a donc des **processus**, notamment d'individuation, comme l'exprime Simondon même si « L'être individué n'est pas tout l'être ni l'être premier ». Cette constatation ouvre sur le second chapitre, sur l'être vivant. Pour Aristote, la **vie** est déterminée par son **fonctionnement** : elle « consiste à se nourrir soi-même, à croître et à dépérir ».

Selon Morange, ce fonctionnement du vivant est expliqué par les facteurs de « structure moléculaire, métabolisme et reproduction ». Ainsi, il ne peut en être autrement de par la nature matérielle du vivant, et, par son fonctionnement, elle est « contagieuse ». Une description matérielle du vivant est donc nécessaire, mais insuffisante quand on veut rendre compte de ses particularités. Par exemple, elle se transmet. Il y a donc un lien entre tous les vivants, même si la vie revêt diverses formes. De plus, la vie suppose de répondre à des contraintes (les besoins vitaux) pour survivre comme respirer, dormir, boire, manger. Le vivant survit en s'alimentant d'autres vivants, pour les espèces non-végétales. Nous passons donc d'une « **ontologie substantielle** à une **ontologie relationnelle** ».

Comte reprend l'idée de Bichat selon laquelle « être vivant, c'est échanger dans un milieu. », le **milieu** correspondant à ce qui est nécessaire à sa survie, le milieu faisant évoluer l'individu, du milieu intra-utérin, au milieu terrien, par un ensemble de processus naturels nécessitant une durée, précise. Le vivant est un « système ouvert » et l'interaction entre le vivant et son milieu est notamment décrite par Changeux dans « L'Homme de vérité ». Ce qui émerge des réflexions de ce second chapitre est donc qu'il y a un ordre dans les choses, et cet ordre ouvre sur la notion évoquée dans le troisième chapitre : **la continuité**. Bergson définit « l'évolution des vivants » comme étant une « création continue d'imprévisible forme, (...) un jaillissement interrompu de nouveautés (...) ». En contemplant la biodiversité qu'il reste aujourd'hui, on ne peut qu'être

d'accord avec ce philosophe. Mais, penchons-nous sur une plage pour contempler, aussi, la diversité des pierres. Alors, l'évolution créatrice de Bergson prendra un sens plus universel. La vie sera à inclure comme un phénomène de la construction cosmique. Mais dans quelle mouvance se colore cette idée ? « Panthéisme, spiritualisme, matérialisme, émergentisme » ? Si son œuvre fût critiquée, on peut toutefois apprécier cette intuition qui met en exergue une caractéristique commune dans la diversité du réel : la créativité. De plus, à partir de la notion de créativité, il est possible d'aborder le chapitre suivant sur la dialectique entre **génération** et **destruction**.

Pour Aristote, il n'y a pas d'origine de l'univers, qu'il suppose éternel, mais ce qui s'y manifeste possède une durée d'existence. Il s'agit de s'habituer à être de passage, de s'habituer à l'éphémère, à être et ne plus être. Ensuite, il s'agit de nuancer la notion de **changement** qui peut être **partiel** « (altération) », mutation, ou **total** « destruction », disparition. Whitehead travailla sur ce point : « le fait de cesser d'être ». Si Platon ne l'a pas traité, c'est sans doute parce qu'il pensait que « ce qui passe et cesse d'être ne périt pas entièrement. » En effet, il est possible de penser en termes de succession et de métamorphoses à l'image du phénix. Whitehead prit donc les cendres comme source, dans le sens des traces que laissent le passé pour fonder l'avenir. Pour Whitehead, la description de ce qui est ne réside pas dans l'attribution de propriétés. Selon lui, la substance serait « dans les **événements** » et non pas des événements isolés mais « interconnectés », articulés. Il décrit deux mondes, celui des faits et celui des valeurs et la nécessité d'une « cohérence des valeurs pour la coordination des actes. » Pour Whitehead, les lois peuvent elles aussi évoluer. Il en émerge deux mondes : le « monde réel », naturel, fluctuant, constitué d'éléments souples, telle une mosaïque plastique, et celui, conceptuel, construit par le langage. Or, les mots doivent être fixes pour avoir un sens, pour être mis en relation. Alors, le point commun entre ces deux mondes est la nécessité de définir le « contexte ». Or, le contexte renvoie aux **conditions d'existence**.

Cela pose en particulier la question des conditions d'existence de l'être individuel. Pour Aristote, un **être individuel** est « un arrangement singulier (unité, unicité, identité) de matière et de forme ». Mais cet être change alors que subsiste-t-il ? La thèse de Simondon sur l'individuation évolue de sa dimension physique, puis vitale, à celle psychique et collective, mettant en exergue la relativité de l'individu par rapport à ses **environnements**. Il a effectué une véritable « randonnée philosophique » aboutissant sur le fait que « l'individu n'est pas le tout de l'être », et Simondon s'intéresse à « l'élément fondamental ». Il évoque la relation entre l'individuel et le collectif, la cohésion du réel par « un ensemble de champs », et l'expression

de la volonté face à une diversité de forces. L'expression de l'individu se manifeste donc dans une tension entre **appartenance** et **singularisation**.

Enfin, l'idée de la thèse finale de Simondon soutient que « ce n'est pas le devenir qui modifie l'être, mais l'être qui devient ». Simondon distingue aussi les objets, entre les objets techniques (artefacts) et les objets naturels. Il évoque la notion de civilisation et s'intéresse à « l'avenir de l'humain ». Gilles Hottois souligne l'apport de son œuvre et la nécessité d'intégrer une « culture technoscientifique ». Simondon s'est interrogé aussi sur le sens même de l'évolution. Or, comme nous l'avons aussi exposé dans notre thèse, la détermination de la connaissance des formes d'évolution et de l'évolution humaine est relative aux techniques et aux facultés cognitives, des moyens de séquencer les génomes, par exemple, à ceux de sonder le ciel et les particules. Le sixième chapitre de ce livre sur l'« *Ontologie du devenir* » en est l'illustration, puisqu'il explique que l'astrophysique permet de comprendre au XX^{ème} siècle, à l'instar du vivant au XIX^{ème} siècle, que l'univers n'est pas statique. Alors, la question est posée : « l'astrophysique est-elle une science historique ? » Elle est historique dans le sens où ses connaissances évoluent avec les outils techniques et conceptuels. Cependant, elle permet de décrire les constances de son objet : l'univers. Ces **constantes** décrivent comment l'univers évolue et pourquoi il évolue ainsi. Mais, fondamentalement, pourquoi fonctionne-t-il avec ces invariants ? L'univers est-il **déterminé ou indéterminé** ? A ce propos, le débat fit rage entre Bohr et Einstein, penseurs de deux pans de la physique : la physique quantique et la physique relativiste en physique théorique. Mais, pourquoi ne pas résoudre le problème par la relativité : Il est déterminé dans certains cas, et indéterminé, avec des degrés de liberté, dans d'autres. Un élément de réponse plus formel est donné par Ilya Prigogine sur le fonctionnement entre l'**ordre**, organisation, et le **chaos**, dissipation de l'ordre, par le maintien à l'équilibre et la notion d'**entropie**, dégradation de l'énergie.

Face à cette diversité de théories en physique pouvant inspirer des réflexions philosophiques, à la fin de ce chapitre, Françoise Combes exprime la représentation que nous avons à présent de l'univers, un **univers dynamique**, et non statique. Nous avons la connaissance de son expansion et de l'accélération de cette expansion par l'énergie noire (ou sombre). Elle rappelle que nous ne connaissons que 5% de son contenu, la matière ordinaire, baryonique. Puis, elle présente le **modèle de l'inflation** comme une hypothèse permettant de résoudre plusieurs problèmes de la cosmologie, en fournissant notamment « des fluctuations quantiques initiales ». Il y aurait une polarisation des forces, et même une cinquième force, répulsive, avec **l'hypothétique champ de l'inflaton**, « comme de la gravité négative ». L'inflation serait éternelle et des univers multiples, évoluant indépendamment, ne pourraient communiquer.

Reste la nécessité d'apporter des preuves empiriques à ce modèle et, philosophiquement, à s'interroger sur les limites des possibles.

Dans le dernier chapitre, **les limites du possible** sont présentées comme les **contraintes**, « les règles du jeu » et « les circonstances » des événements. Plus les systèmes sont complexes, plus les **circonstances**, les conditions permettant l'évènement, l'historicité, est importante. Chaque détail possède une place dans l'orientation des événements à venir (pensons aux conséquences de la disparition des dinosaures.) « On ne crée rien à partir de rien » déclare, quelques pages plus tôt, Françoise Combes. Toutes les sciences ont donc une dimension historique pour expliquer la **causalité logique des faits**. Mais, traditionnellement, l'histoire n'était pas considérée comme une science, car elle ne permettait pas de découvrir. Lorsque la structure de l'encyclopédie fut conceptualisée, les facultés de mémorisation, de raisonnement et d'imagination permirent de construire cet arbre littéraire des connaissances. L'histoire fut alors associée à la mémoire, la philosophie et la recherche scientifique à la raison et l'imagination, la créativité, aux arts. Cependant, ces trois facultés ne sont pas distinctes. Il faut de l'imagination aussi en science pour postuler des théories et de la mémoire pour se souvenir des acquis. De plus, connaître l'histoire permet de comprendre **le présent, l'actuel, et les perspectives d'avenir**.

Ainsi, il ne s'agit pas seulement d'identifier les régularités, mais aussi de comprendre ce qui fait que ces régularités sont. Si « l'impossible est ce que les contraintes naturelles empêchent », la question est alors de savoir ce qui rend le possible réel. Le possible est conditionné au « faisable ». Le possible est aussi relatif à la volonté de le réaliser et à un processus de décision, quand plusieurs alternatives existent. Le possible peut aussi devenir réel, par hasard, sans raison justifiant la réalisation de l'un plutôt que de l'autre, s'il est **probable**. Il émerge alors une nouvelle dialectique, celle du **probable et de l'improbable**.

Les sciences de l'univers et du vivant ne sont donc pas uniquement tournées vers le passé, mais aussi vers l'avenir, afin de l'envisager, considérant aussi la place de l'humain comme accessoire ou, au contraire, participative dans la totalité du réel. Ainsi, l'ouvrage « *Ontologie du devenir* » s'achève sur une « ontologie de la **contingence** ». Les actions parmi les degrés de liberté du vivant impactent dans la construction de son avenir, et celui de notre commune planète. Alors, quand on constate la variété de pollutions et de problèmes environnementaux à l'ère de l'anthropocène, « agir rationnellement est plus qu'un devoir ; c'est une nécessité ». Il ne s'agit donc plus seulement de comprendre les évolutions ayant conduit à une diversité de systèmes complexes, comme la pensée ou la société humaine contemporaine, il s'agit d'introduire la

notion de **responsabilité** dans l'action humaine collective. Il faut changer le cours de **l'évolution civilisationnelle** quand l'action humaine menace la survie du vivant. Toutefois, ces dernières considérations sont marquées d'un sens éthique, par la notion du devoir, de faire ou de ne pas faire, dans la philosophie environnementaliste contemporaine. Alors, il semble pertinent, dans une autre annexe, de traiter d'un autre type d'évolution : l'évolution des courants philosophiques.

Annexe IX.

La diversité des courants philosophiques et leur apport particulier :

la connaissance des *processus* par le fonctionnalisme **et la considération du *composant* par le matérialisme.**

Introduction

Après avoir examiné une diversité de domaines scientifiques, d'explications, de types d'évolution, nous nous intéressons à présent à l'évolution des courants philosophiques. Cet examen des formes de diversités, des possibilités de différencier, illustre encore qu'une totalisation réduite à une théorie, ou à un seul principe, est difficilement défendable et ne conduit qu'à un dogmatisme, la croyance en une vérité fondamentale. De plus, ce travail montre que l'analyse des sous-domaines d'un domaine, les disciplines en science ou les courants en philosophie, fait ressortir le lien et la variation possible dans un domaine. En philosophie, la similitude est la méthode, l'analyse conceptuelle, et la variable est le choix du concept fondamental. Face à la diversité des courants dans l'histoire de la philosophie, nous choisissons deux courants nous semblant pertinents pour notre thèse : le fonctionnalisme, ayant pour concept fondamental la fonction, et le matérialisme, ayant pour concept fondamental la matière.

Nous avons pour objectif de mettre en exergue l'apport particulier de ces deux courants : l'approche **processuelle** pour le fonctionnalisme et l'approche concrète attachée aux **composants** pour le matérialisme. Nous faisons aboutir notre réflexion sur le fait que conjuguer ces deux approches permettrait d'obtenir une description, non ultime (puisque le réel est une incessante création à laquelle l'activité humaine participe), mais au moins à une description plus complète du réel. Afin de traiter du fonctionnalisme, nous nous référons à un article

d'Elisabeth Pacherie, philosophe analytique, qui fait un état des lieux de ce courant philosophique. Concernant le matérialisme, déjà évoqué dans la thèse, nous nous référons à une histoire générale de ce courant avec l'ouvrage synthétique de Pascal Charbonat intitulé : *histoire des philosophies matérialistes*.

1. Le fonctionnalisme : des processus multiples.

En introduction, Elisabeth Pacherie précise que l'approche fonctionnaliste est utilisée en relation avec plusieurs domaines (sociologie, biologie, etc.) et, que selon le domaine, la définition de la fonction varie. Dans cette synthèse, elle traite uniquement de ce qui concerne les sciences cognitives. Tout d'abord, l'idée remonte à Aristote, mais elle évolue. Dans les années 1960, sa conceptualisation résulte d'une question méthodologique de la philosophie des sciences. Ce courant propose alors d'utiliser les concepts de la psychologie du sens commun pour définir le mental. Puis, il devient même un modèle explicatif. Ensuite, la fonction est associée à un programme ou à l'usage. Face à ces variations, la clôture explicative est donnée par la définition même de ce courant philosophique : psychologisante pour le premier courant, machiniste pour le dernier, voire pragmatiste.

Dans le domaine des sciences de l'esprit, ces analyses conceptuelles émergent de la question du rapport entre le corps et l'esprit. Elle questionne donc aussi la cause de ces rapports et induit un positionnement par rapport à la philosophie physicaliste, dont il existe une diversité de nuances. Le physicalisme conçoit principalement la physique soit comme la « science fondamentale de la nature », soit comme « unité de la science », comme le précise Elisabeth Pacherie dans un autre article⁷⁰. Le fonctionnalisme est aussi confronté au réductionnisme soit épistémologique (réduction à la méthode analytique), soit ontologique (réduction à une élémentarité sous-jacente).

Face à ces alternatives, les positions divergent, et certains proposent une « multiréalisabilité physique », ⁷¹ comme l'écrit Pacherie. Cela entend que les modes de réalisation physique sont variés, et non unique. Cette position permet de décrire un certain niveau d'autonomie dans le

⁷⁰ Pacherie Elisabeth, « Physicalisme et réductionnisme » dans *Naturaliser l'intentionnalité. Essai de philosophie de la psychologie*, PUF, 1993, pp.39-58

⁷¹ Pacherie Elisabeth, « Le fonctionnalisme : état des lieux », *Intellectica*, 1995/2, 21, pp.9-37

fonctionnement particulier du mental et de conserver une relation avec le substrat physique. En somme, il faut de la « matière », mais ce composé matériel possède un fonctionnement, un mode de relation, particulier, et pour certains fonctionnalistes, ces relations seront causales de l'état mental, donc déterminantes. Il s'agit alors de décrire en quoi ces causes se distinguent de la physique et comment elles sont reliées à elle.

Cette nécessité conceptuelle oriente vers le courant machiniste, connu en particulier avec la machine de Turing, où le système explicatif repose sur des entrées et des sorties avec un programme. Mais le fonctionnalisme de Turing est notamment confronté au problème de la distinction entre pensée et croyance, et sur l'intensité du ressenti. Les difficultés que rencontrent ce type de fonctionnalisme peut déboucher sur la question de l'intentionnalité. Ainsi, le fonctionnalisme ne permet pas une méthode de description suffisante « des croyances et des désirs individués » (Pacherie 1995). Alors, cette tournure du fonctionnalisme peut ouvrir sur une explication computationnelle des états mentaux, mais elle ne dit rien sur leur contenu et la formation de ces contenus symboliques : les représentations.

La question du contenu symbolique implique de traiter le problème de la signification. Toutefois, la sémantique fonctionnaliste se heurte à son tour à des difficultés. La première difficulté est la diversité d'interprétations. Ensuite, elle se heurte à la question de la relation entre internalité et externalité, en particulier dans la causalité d'émergence d'une pensée. Enfin, ce fonctionnalisme risque de se heurter à un holisme, ne correspondant pas à son modèle explicatif. En effet, si le fonctionnalisme veut résoudre ses difficultés, il s'agit de donner une explication sur la psychologie intentionnelle par des relations fonctionnelles. Ces relations fonctionnelles doivent être généralisantes, en lois. Il s'agit de prouver que le contenu intentionnel est déterminant du comportement. Mais, si l'interprétation est instable, changeante, une description invariante n'est plus possible. Elle devient alors probabiliste et indéterminée. Et, le courant de pensée de Davidson, l'anomalisme intentionnel, selon lequel « il n'existe pas de lois psycho-physiques strictes » va dans ce sens. (Pacherie 1995)

Le fonctionnalisme est donc insuffisant pour décrire la diversité de l'activité mentale, dont « les propriétés phénoménales ou qualia, l'effet que cela fait (Nagel 1974) de ressentir (...) » (Pacherie 1995). Comme nous l'avons expliqué dans la thèse, certaines représentations viennent de l'histoire de vie. Il existe donc une diversité d'interprétation et le choix d'interprétation est subjectif, comme le référentiel des valeurs, et ce qui touche, la formation des émotions et des sentiments, le jugement, même, qui repose sur une grille de critères, elle-même relative à un choix de normes. Le fonctionnement des qualia n'est donc pas automatisable

et totalement prédictible. De plus, **la sensation** est difficilement explicable à une personne qui ne l'aurait pas éprouvée. Il est possible d'en donner la cause, mais pas de décrire l'effet. Le mot joie, par exemple, n'est pas l'effet.

Cependant, le fonctionnaliste va renaître à partir de **l'approche computationnelle** avec la théorie de l'information. Le contenu mental devient alors explicable grâce à celle-ci. Mais la plurivocité de l'information se pose puisqu'elle est relative à un système, à des référentiels. Nous avons aussi traité cette question dans la thèse. De plus, au problème de la clôture sémantique, la signification, s'ajoute celui de la clôture téléologique, la finalité de la fonction. Cette question philosophique éloigne le fonctionnalisme de la vision naturaliste, car elle sous-tendrait une marque d' « intention », une volonté dans la nature, sauf si elle associe l'apparition des fonctions cognitives avec l'évolution naturelle des espèces dans le sens d'une évolution cognitive. Cette question peut donc ramener au lien inter-explicatif entre les sciences.

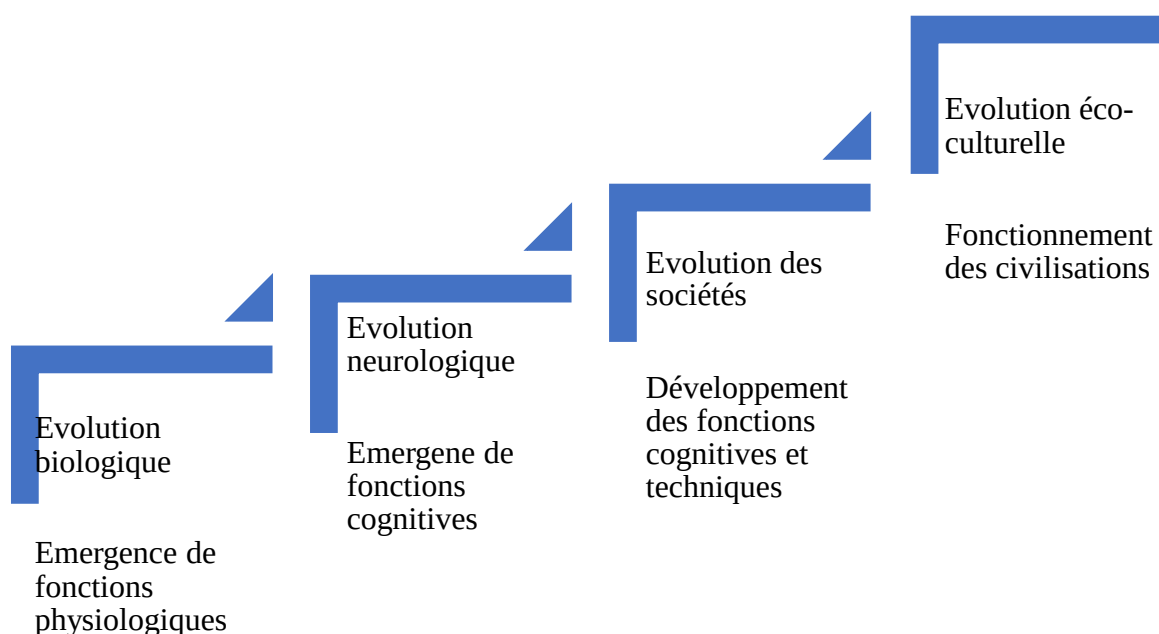
Par ailleurs, si certains fonctionnalistes ont affirmé que ce courant était compatible avec un physicalisme faible, la question de la relation entre ces deux courants se pose. Est-elle moniste ou pluraliste ? Nous pensons qu'une philosophie des sciences contemporaine ne peut se réduire à l'analyse des méthodes scientifiques, en général, ni au cloisonnement de questions philosophiques spécifiques par domaine et maintenir les domaines isolés. Une interdisciplinarité scientifique est nécessaire à la réflexion philosophique et c'est ce que nous avons tenté de montrer dans cette thèse en argumentant en faveur de la pluralité des sciences.

En outre, passer de la question des sciences cognitives à la physique, c'est manquer une étape dans la réflexion, celle de la biologie. En effet, la notion de finalité de la fonction, dans les sciences cognitives, est à analyser au regard de l'histoire de l'apparition des fonctions cognitives dans l'évolution des formes de vie pour demeurer dans une approche naturaliste. Des ponts sont alors possibles à partir de la notion de **réseau**, qui présente non plus une approche linéaire, mais une diversité de modes de réalisabilité par des interconnexions. La topologie en réseau peut correspondre davantage à la diversité du réel qu'à une explication unique autour de généralisations, de lois physiques, qui par une trop large abstraction n'étreignent pas le phénomène du vivant et de la pensée, qui pourtant les formalisent.

Enfin, la **diversité des fonctions** (biologiques, cognitives, etc) permet une description plus large en termes de **processus**, où chaque fonction peut être considérée comme une étape dans **l'évolution naturelle du réel et dans le rapport de l'humain avec la nature (éco-culturelle)**, puisque la fonction qualifie, initialement un ensemble d'opérations. Ainsi, au cours de

l'évolution cosmique et géologique, avec l'évolution biologique, une diversité de fonctions physiologiques apparaît. Puis, avec l'évolution neurologique des individus, neurogenèse, des fonctions cognitives émergent et, l'évolution des sociétés est relative au développement des fonctions cognitives et techniques. Enfin, il est possible d'analyser le fonctionnement des civilisations pour décrire l'évolution éco-culturelle, c'est-à-dire, du rapport que l'humain entretient avec son environnement (confer Schéma).

Conclusion : une diversité de processus



Pour conclure, nous comprenons que la notion de fonction, fondement conceptuel du fonctionnalisme, est très utile tant en science qu'en philosophie pour décrire des processus. Et, sa définition est relative à la discipline. Cependant, ces processus ne sont pas éthérés. Ils sont réalisés par des matériaux spécifiques : les réactions métaboliques d'un organisme, les connections neuronales par les neurotransmetteurs et neurohormones, etc. L'action, naturelle ou humaine s'inscrit dans la matière. Le courant philosophique matérialiste est donc nécessaire et complémentaire afin de comprendre le réel.

2. Le matérialisme : la quête des composants.

Afin de trouver une définition unifiant la diversité des formes de matérialisme, dans la préface, Guillaume Lécointre qualifie ce courant philosophique comme étant l'affirmation que « tout ce qui est réel est matière ou manifestation de celle-ci ». Mais qu'est-ce que la matière ? Nous savons aujourd'hui que la matière baryonique ne représente que 5% du contenu de l'univers et qu'une matière exotique (non-connue), uniquement caractérisable pour le moment par sa masse représenterait plus de 80% de son contenu ! Cette histoire des philosophies matérialismes nous permettra de comprendre les différentes manières de qualifier la matière au fil des siècles et l'apport spécifique de ce riche courant philosophique.

Bunge, cité par Lécointre, précise que « ce qui est matériel est ce qui est changeant, c'est-à-dire doté d'énergie » (Charbonnat 2007). L'énergie est donc ce qui modifie la matière. Mais, si elle modifie la matière, elle n'est pas matière. Il n'y a donc pas que la matière dans le réel. Cette vision n'est donc pas moniste. Nous préférons dire, à la suite d'Einstein, qu'il existe un principe d'équivalence entre la matière et l'énergie, afin de résoudre ce point car, Lécointre ajoute la précision de Charbonnat : le matérialisme est moniste et immanentiste. Et, l'avenir du matérialisme peut être envisagé soit dans le « matérialisme évolutionniste » (Büchner), soit dans le « matérialisme dialectique » (Engels, etc.), soit dans leur fusion. Lécointre souligne que le matérialisme émergentiste est peu traité dans cet ouvrage et qu'il pourrait être en capacité d'aborder « les sciences intégratives », telle que la psychologie. (Charbonnat 2007).

Dans son introduction, Charbonnat distingue origine et commencement, en affirmant que pour le matérialisme l'origine est immanente, autrement dit : l'univers se développe de manière immanente (et non avec une origine transcendantale). Le commencement concerne le début de quelque chose qui apparaît, émerge (par exemple, l'apparition de la vie qui n'a pas toujours existé). Le commencement n'est pas traité par le matérialisme qui pense que l'univers a toujours existé. Il y a toujours eu quelque chose. La thèse opposée à l'immanence de l'univers affirme qu'une transcendance est nécessaire et source du « développement universel » (Charbonnat 2007). Elle est donc surnaturelle, divine. Une histoire du matérialisme implique de considérer le contexte politique, social, religieux, fluctuant au fil des époques. Il s'agit de resituer un lien entre une pensée et « son milieu d'existence ». (Charbonnat 2007). Le matérialisme évolutionniste explique les changements par gradation et continuum. Il pourrait s'illustrer par la célèbre phrase de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Le matérialisme dialectique intègre des renversements, voire des contradictions que produisent la complexité. Nous pouvons penser à l'intrication quantique : le changement d'état d'une particule génère un changement sur une autre, quand elles sont séparées, si elles

ont déjà interagi ensemble. Mais ne décrivons pas toutes les variantes du matérialisme pour le moment...

Commençons par examiner le début de la pensée matérialiste. L'ouvrage est construit en trois parties, trois époques. La première partie, du 7^{ème} siècle avant JC au 1^{er} siècle de notre ère, étudie son apparition. La seconde partie, relate sa période d'extinction du 1^{er} au 17^{ème} siècle, et son remplacement par le naturalisme. La troisième et dernière partie, traite de sa renaissance et de son développement du 18^{ème} au 20^{ème} siècle, notamment avec la dynamique des Lumières. Nous comprenons donc que l'histoire du matérialisme est traitée en rapport avec la pensée de filiation gréco-romaine et non celle de l'Asie, par exemple. Déjà, le chantier est conséquent. Mais, l'inclusion d'autres régions du globe aurait été intéressante, car ce livre met parfois en confrontation cette philosophie et les religions monothéistes. Alors, puisqu'il cite le fait religieux, même si c'est de façon défavorable, il aurait été intéressant d'inclure des religions polythéistes (hindouisme par exemple), ou d'autres formes de spiritualités (animisme, paganisme, bouddhisme, taoïsme, panthéisme, panenthéisme, etc.) ou tout simplement l'agnosticisme. A ce propos, nous renvoyons à l'article « Le matérialisme doit-il être athée ? » De notre côté, nous pensons qu'il faut distinguer ce courant philosophique de la question de la diversité de croyances et s'en tenir à l'analyse conceptuelle de la matérialité. Nous conserverons donc surtout de cette histoire, **l'évolution terminologique.**

Pour Charbonnat, la genèse du matérialisme remonte aux prédémocritéens par l'idée de distinguer la connaissance du mythe ou du religieux. Il cite Thalès et Héraclite, dans le sens où ils cherchent à comprendre les phénomènes naturels. Mais étant donné la séparation ultérieure entre le matérialisme et le naturalisme, nous préférons ne pas nous étendre sur ces philosophies de la nature et commencer par Démocrite. Démocrite choisit la voie de l'atome, et en cela, il peut être pensé comme l'antique père du matérialisme. Choisir comme fondement l'atome, c'est préférer comme explication la plus petite unité de matière, ce fragment qui, à l'époque, fut imaginé comme insécable, à l'instar de nos particules élémentaires contemporaines. Le moniste de Démocrite fondé sur l'atome, l'infime matière constituant de tout, s'oppose par exemple au dualisme « intellect/corps » d'Anaxagore. Ensuite, le matérialisme épicurien est proche de celui de Démocrite. Au mécanisme **atomiste**, l'épicurisme ajoute « la permanence de la matière ». Mais Épicure se détache de Démocrite par son **empirisme**, alors que le second tend au scepticisme. L'expérience est perçue chez les épicuriens comme « le point de contact entre la nature et l'intellect ». Par ailleurs, la différenciation de la matière chez Démocrite relève de « degrés ou d'échelles ». Chez les stoïciens, le « démiurge n'est que matière (une sorte de fluide) », à l'instar de la notion contemporaine d'énergie utilisée hors d'un cadre scientifique.

Enfin, avec la philosophie matérialiste antique, l'affirmation de la notion d'immanence permet de rejeter la question « d'un commencement spatio-temporel ». (Charbonnat 2007).

Les fondations du matérialisme étant posées par l'atomisme et l'épicurisme, elles vont être remplacées par d'autres pensées dominantes entre le premier et le dix-septième siècle. Après l'hétérodoxie embryonnaire, le premier **naturalisme** est avant tout contestataire de la pensée scholastique et le second est basé sur un désir de refonder la physique en lien avec « les phénomènes ». (Charbonnat 2007). De nombreux philosophes sont cités dans l'ouvrage de référence dont Telesio qui a la particularité de tenter une nouvelle physique, différente de celle d'Aristote. Cependant, il ne parviendra pas à sa mathématisation galiléenne. L'idée étant de décrire « les forces naturelles observables ». (Charbonnat 2007). Bien entendu, Giordano Bruno est cité comme naturaliste du 16ème siècle caractérisé par son association de l'univers et de l'espace à l'infini : « Il y a un moteur universel infini, dans un espace infini ». (Charbonnat 2007). Nous savons le triste sort qui sera rendu aux réfractaires de la pensée dominante de l'époque. Nous passons assez vite sur les variations de la pensée de ces siècles et mentionnons seulement Francis Bacon (déjà cité dans notre thèse) qui représente « l'apogée du naturalisme méthodologique ». (Charbonnat 2007). Cet ouvrage est intéressant car il met en relation sociologie et philosophie. Cependant, nous restons orientés sur l'évolution uniquement conceptuelle. De ce point de vue, nous passons par trois courants naturalistes : l'atomisme, l'empirisme, et à présent, l'irreligion, qui « n'est pas nécessairement athée », mais rejette le dogmatisme, « les institutions religieuses et leurs croyances », « pensant qu'elles ne font pas appel à la raison humaine ». (Charbonnat 2007). Dans ce courant, la raison est donc première.

Dans ce 17ème siècle **naturaliste**, Descartes et Spinoza sont cités, non comme matérialistes, mais bien comme naturalistes, leur système de pensée reposant sur « un principe transcendant ». (Charbonnat 2007). Le choix de la primauté de la **raison** tisse le berceau des Lumières et ouvre la troisième époque : « renaissance et développement du matérialisme ». Le mot matérialiste est largement usité au 18ème siècle, mais dans un sens péjoratif comme celui de libertin. Cette qualification a essentiellement pour objet de marquer une pensée athée ou déiste. Elle est donc plus associée à la croyance religieuse ou à son absence qu'à l'analyse philosophique du réel. A cette période, le problème du commencement est abordé dans les sciences, en particulier en géologie, puis l'origine devient un problème philosophique. Elle est « patente chez Diderot et chez La Mettrie ». (Charbonnat 2007). La philosophie matérialiste est alors tentée par deux chemins : intégrer les avancées scientifiques qui décrivent « comment la matière se combine pour parvenir aux formes stables connues » ou choisir la notion de création. De plus, avec la philosophie matérialiste apparaît son opposé, une philosophie antimatérialiste, mettant en

valeur l'intelligence et la perfection dans le monde. Fénelon serait comme le précurseur de l'intelligent design si l'on peut se permettre cet anachronisme volontaire. Jean Meslier se dresse alors contre la pensée fénelonienne et pose comme principe anti-crétionniste et immanentiste « l'expérience sensible ». De plus, pour ce philosophe, « tout est égal dans la matière ». (Charbonnat 2007).

Le **sensible** devient vraiment « le pivot » du matérialisme dans la philosophie du médecin de La Mettrie. Prônant « une histoire naturelle de l'Homme ». (Charbonnat 2007). Pour lui, l'origine n'est pas un problème philosophique. Il récusé tout simplement l'idée de moteur premier et l'explication du vivant réside dans la machine de la nature et les perpétuelles transformations de la matière. Nous passons encore plusieurs philosophes et mentionnons l'intérêt de la philosophie de Diderot permettant une science ouverte, ouverte à de nouvelles connaissances et à un « empirisme encyclopédique », puisque sa pensée n'est pas « un système philosophique clos » (Charbonnat 2007). L'encyclopédie est alors une base, et non un édifice entier. Mais la question de l'origine du sensible se pose et l'hypothèse du passage de l'inerte au vivant par « un mouvement inscrit au cœur de la matière » est posé. (Charbonnat 2007). Le sensible, qualifiant le vivant, est alors subsumé avec l'inerte dans la notion plus large de matière. Cependant, la primauté de la matière sensible est faite par certains et il s'agit de conceptualiser ce passage entre les différents états de la matière inerte et sensible. Alors « la machine devient le symbole de cette unité » ou articulation. (Charbonnat 2007).

Le « **matérialisme mécaniste** » voit donc le jour. (Charbonnat 2007). Et, nous sommes aussi dans l'ère industrielle... Mais le matérialiste n'est pas univoque. Le matérialisme peut être soit mis en opposition avec le « spiritualisme » et prôner le naturalisme et le réalisme comme le fait Büchner, soit ouvrir au déterminisme, comme le propose Claude Bernard, pour qui la matière n'est pas cause mais condition. Un matérialisme physiologique, selon Bertin, permet de tout décrire à partir « de la matière et de la Force ». Les opposants sont alors les finalistes et les vitalistes. Puis, le matérialisme se voit devenir une arme contre l'idéalisme. Ensuite, l'histoire du matérialisme de Lange, rédigée en 1866, tente de mieux circonscrire ce courant de pensée avec l'apport kantien, postulant que la diversité des matérialismes repose sur le problème de délimitation de l'objectivité (la chose en soi) et de la subjectivité. Par ailleurs, le courant du matérialisme évolutionniste est en fait un matérialisme scientifique, car il fait écho aux progrès des sciences sur la compréhension des phénomènes d'évolution. Puis, l'inclusion de la notion d'histoire permet le développement d'un matérialisme historique et la diversité de causalité est posée incluant, donc un aspect dialectique.

L'immanentisme dialectique incarne alors la conscience d'un perpétuel changement. Mais, en observant de plus près la philosophie de Büchner, on discerne un pluralisme, et non un monisme, puisqu'il choisit deux fondements, l'énergie et la matière. Selon lui, le mot énergie correspond « au mouvement des atomes » et le mot matière signifie les atomes en général. Mais d'où vient ce mouvement des atomes s'il n'est pas matériel ? Nous avons déjà soulevé le problème que peut poser la notion d'énergie dans la conceptualisation du matérialisme. Pour un autre philosophe, Rochoux, les atomes ne peuvent faire autrement que ce qu'ils font. L'activité atomique est donc spontanément en mouvement et « la **spontanéité** constitue une propriété originelle de la matière » (Charbonnat 2007). Cela ouvrirait presque vers une forme de pragmatisme pour qui l'action prime et où l'action qualifie l'être. En somme, la matière est mouvement et mouvement spontané. Cependant, il y a bien des lois, des invariances, qu'il ne faut pas oublier.

Alors, avec Conta, le matérialisme prend une connotation fataliste, les choses sont ce qu'elles sont, permettant de sortir du débat création/hasard. Et, il pose l'idée d'une « ondulation universelle », introduisant ainsi la notion de **discontinuité**. Pour lui, « la substance matérielle remplit à elle seule l'univers » (Charbonnat 2007). En cela, la matière est plutôt assimilée à une « matière-énergie » (sans distinction), une matière mouvante. Tout bouge, tant les corps animés qu'inanimés ! En somme, le matérialisme conçoit une plasticité de l'univers précédant sa géométrisation par Einstein. Ensuite, le courant matérialiste prend une tendance encore plus politique, notamment avec Marx et Engels, et ce n'est qu'en 1887, que l'idée de « Matérialisme dialectique » ou « dialectique matérialiste » apparaît sous la plume de Feuerbach. Cette conception matérialiste est appliquée dans l'ouvrage « *Dialectique de la nature* » de Engels.

Puis, la conception **moniste** du matérialisme est formalisée par Plekhanov autour d'« une unité ontologie du monde, qu'elle ait pour fondement la nature ou l'esprit ». (Charbonnat 2007). Mais, l'unité de l'univers découle « de l'antériorité de l'être sur la pensée ». La nature est « l'élément primordial ». Par ces mots, on peut s'interroger sur une éventuelle déification des notions d'être ou de nature. D'ailleurs, Feuerbach et Plekhanov considèrent « le panthéisme de Spinoza comme un matérialisme théologique ». Nous voyons donc le risque ne pas suspendre son jugement, selon l'antique notion d'épochè, de passer de l'analyse conceptuelle, philosophique, à la dimension subjective des croyances. On peut même oser extrapoler que le choix entre monisme ou pluralisme, s'il se fonde comme vérité ultime, se rapproche du théisme et polythéisme.

Avec ces considérations, nous arrivons au matérialisme du 20ème siècle, avec la présence des deux courants matérialisme dialectique et matérialisme évolutionniste, puis l'apparition de **nouvelles nuances**. Le matérialisme dialectique est victime de sa coloration politique. Et, le matérialisme évolutionniste décline, ne s'adressant plus particulièrement qu'aux sciences du vivant, puisque l'univers est encore conçu comme étant stable.

Ensuite, il prend un virage vers d'autres sciences, les neurosciences, tentant « une unification de l'étude de la psyché ». En 1947, Charles Mayer propose un matérialiste progressiste, « ni marxiste, ni mécaniste », mettant l'accent sur la possibilité que l'humain a de se construire lui-même. Dans son ouvrage *La philosophie de la Nature*, il expose « un système immanentiste du réel ». Après, le matérialisme réductionniste, ou physicaliste (pour la nuance nous renvoyons à l'article d'Elisabeth Pacherie) apparaît en opposition « au dualisme cartésien ». Levin soutient que « le mental est un phénomène matériel ». A son tour, le matérialisme est vivement critiqué par les fonctionnalistes. Le réductionnisme prend alors un nouveau tournant vers une dimension plus épistémologique qu'ontologique. Puis, le matérialisme éliminativiste, ou réductionnisme éliminativiste, apparaît avec Churchland pour qui les états mentaux tels qu'actuellement décrits n'existent pas. Il souhaite aboutir à une « explication ascendante » de la physiologie aux facultés mentales. Il tend donc vers une élimination de « la psychologie du sens commun ». Pour approfondir cette tendance contemporaine, nous renvoyons vers les deux ouvrages parus chez Vrin, Tome 1 et 2, intitulés : *Philosophie de l'esprit*.

Avec Lewis et Kim, une seconde voie est offerte au réductionnisme par la thèse de l'identité « prenant au sérieux la possibilité de l'existence de plusieurs mondes pour répondre au fonctionnalisme ». Kim rédige des objections au fonctionnalisme et à l'émergentisme, en particulier, par rapport à la relation de **dépendance au substrat**. Kim privilégie alors le terme de réductionnisme à matérialisme. Le matérialisme se scinde alors à nouveau en deux : d'une part, le matérialisme réductionniste, d'autre part un matérialisme émergentiste (non-réductionniste). Ce dernier affirme, en particulier avec Gulick, « un matérialisme ontologique et un pluralisme théorique pour la pensée ». (Charbonnat 2007). Il reconnaît uniquement l'existence « des seules entités de la physique » et une certaine autonomie du mental. (Charbonnat 2007). On peut regretter encore ce saut conceptuel entre physique et activité mentale, qui soustrait l'apport spécifique de la biologie dans la compréhension de la diversité des phénomènes naturels. Mais, une autre voie est proposée par Bernard Andrieu, celle du « **matérialisme dynamique** ». Il affirme que « la matière organise elle-même les différents degrés de son développement ». En cela, il réaffirme l'immanentisme du matérialisme et peut intégrer une diversité de connaissances scientifiques par cet aspect commun de la dynamique

de l'univers, du vivant, de la pensée et même des sociétés. Enfin, la variation contemporaine du matérialisme évolutionniste entre réductionnisme ou émergentisme traduit deux positions philosophiques opposées : l'une basée sur « l'égalité des choses » et l'autre sur les « différences ». Ainsi, nous retrouvons les deux possibilités soit de monisme, soit de pluralisme avec chacun leurs difficultés dont nous avons traité dans la thèse.

Dans notre thèse, nous avons aussi souligné deux réalités : la réalité naturelle, indépendante de l'activité humaine, et la réalité humaine, créatrice d'artefacts, modifiant profondément son environnement et se modifiant lui-même. Il ne s'agit pas d'une simple opposition entre nature et culture, qui est même remise en question par Philippe Descola, mais plutôt d'un questionnement sur la créativité possible de la nature par l'intermédiaire de l'humain, autrement dit, de tous les possibles pouvant encore émerger, insistant encore sur la diversité ontologique. Ceci ouvre aussi sur un autre domaine des sciences, l'anthropologie, et sur un autre type d'évolution, éco-culturelle. Nous soulignons cela car il nous a semblé que la difficulté du matérialisme est d'intégrer ce champ. Adhérer au fait que la pensée est dans le cerveau et que le cerveau est matériel n'est pas difficile. En revanche, comment articuler le fait que ces connections neuronales génèrent des représentations qui poussent à une diversité d'actions et modifient **le monde et l'humain lui-même** ?

Si la physique et les neurosciences furent particulièrement sur le devant de la scène de la pensée, les plus discrètes, la biologie et la sociologie, s'unissent pour répondre peut-être à ce problème avec l'émergence de la « sociobiologie ». Pour simplifier, elle souligne l'influence de la méthode génétique dans l'activité des organisations sociales en vue d'une « unité des sciences ». L'articulation entre ces deux domaines, même si elle n'arrive pas à une unité complète des sciences (comment intégrer les sciences économiques, par exemple ?), elle permettrait en tous cas de saisir un peu plus ce qui est inhérent à l'humain et de donner une description naturelle plus continue entre la matière, le vivant, la pensée et l'évolution civilisationnelle. Ainsi, nous reviendrons davantage à un naturalisme qu'à un matérialisme car, même si nous avons vu la filiation entre ces deux courants, nous soulignons la différence de fondement : l'un est la matière, dans le sens du composant ultime, alors que l'autre insiste sur le fonctionnement de la nature, l'un porte l'attention sur les accrétions, plus ou moins de composant jusqu'à une élémentarité, alors que l'autre s'affranchit de la description ascendante ou descendante, elle décrit simplement comment **le réel est en interaction**, y compris pour produire de l'imaginaire dans l'esprit humain. Nous concluons donc sur le fait que le matérialisme permet de mettre en lumière les apories de différents courants. Il remet sur Terre, dans le concret, le monde des idées. Sa démarche est donc foncièrement immanentiste.

Cependant, sa philosophie n'est pas ultime et sa méthode est même questionnable. En effet, peut-on dire ce qu'est un gâteau à partir de ses ingrédients ? Oui, il faut des ingrédients, mais ils ne suffisent pas à décrire la complexité. Alors, nous pensons que si le fonctionnalisme, qui accorde plus d'importance au processus, et le matérialisme qui est attentif aux composants, pensaient ensemble, cela pourrait peut-être forger **une pensée naturaliste plus complète**.

Annexe X.

La spécificité de la chimie et la diversité des modes d'organisation **dans la construction ontologique.**

Si la chimie est souvent définie comme une branche de la physique par simplification, nous devons, toutefois, dans cette annexe souligner la spécificité de cette discipline. Pour cela, en plus de notre analyse, nous suivrons, en partie, la pensée de Bachelard exprimée dans l'ouvrage *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*, Vrin 2016, puisque ce livre est une histoire de la philosophie de la chimie.

Tout d'abord, rappelons que cette philosophie avança autour de la dialectique pluralisme et réduction, comme l'énonce lui-même Bachelard dans l'introduction. Si la Nature est considérée en « surface » au XVIIIème siècle, elle sera de plus en plus considérée en profondeur grâce aux progrès techniques permettant la construction de nouveaux instruments (télescopes, microscopes, etc.) permettant de voir plus grand, plus large, et plus petit, plus étroitement (de manière peu étendue). Concevoir la diversité en surface consiste à examiner les choses en les séparant (divisant) par groupes d'individus selon un critère d'appartenance et en fonction d'une seule échelle d'observation. Ainsi, on observe des multiples par catégories. Par exemple, il est possible de quantifier le nombre de véhicules automobiles. Il est ensuite possible de préciser encore le champ de description : le nombre de véhicules automobiles qui circule en France en 2023.

Concevoir la diversité en profondeur implique de considérer l'échelle (ordre de grandeur) et les modes d'organisation propre à chaque échelle. Cela génère une description par stratification et la question du nombre de dimension considéré. Par exemple, cette description par stratification donnerait cet énoncé : dans l'univers il existe des champs de forces, liés aux interactions

fondamentales qui sont responsables de la constitution progressive, au cours d'une évolution, des réalités que nous observons à différentes échelles. Dans notre système solaire, il y a des planètes. Sur notre planète, il y a une diversité de matériaux et d'individus. Certains de ces individus sont constitués de cellules. Les cellules sont elles-mêmes constituées de certaines macromolécules. Ces macromolécules sont composées de molécules. Et, ces molécules sont à leur tour constituées d'atomes. Enfin, ces atomes sont composés de particules et les particules sont soumises aux champs de force. Ainsi, dans cette description, la chimie est efficace pour décrire la matière par ses matériaux (constituants).

Mais, la chimie se trouva face à une diversité de substances. Il s'agissait alors de comprendre leurs combinaisons. Il fallait donc réduire le composé en décomposant les molécules et conceptualiser leur unité commune : l'atome. Mais il fallait aussi trouver ce qui permettait leur cohérence en fonction de l'échelle considérée (le fonctionnement des forces électrofaible, électromagnétique, la force forte et gravitationnelle). Le passage de la notion de composé à corps simple est dû à la « révolution lavoisienne ». Puis, cette notion dut être précisée et l'heure était aussi venue à la « classification des composés ». L'évolution des connaissances sera permise en particulier en soulevant les apories d'une théorie, afin de les résoudre. Ainsi, Berthelot s'y attela, comme d'autres, afin de parvenir à une synthèse. Et, l'ensemble des éléments chimiques est signifié par le tableau périodique de Mendeleïev. Plusieurs notions propres à la chimie seront conceptualisées : la notion de valence, d'octave chimique, de nombre atomique et une loi spécifique, la loi périodique énoncée en 1869 : « Les propriétés des corps simples, comme les formes et les propriétés des combinaisons, sont une fonction périodique de la grandeur du poids atomique ». Puis, la loi périodique fut rapprochée de la théorie des nombres par sa discontinuité permettant la quantification. Ainsi, la discontinuité des périodes permet la diversification des éléments et la théorie mathématique des congruences, appliquée à la chimie, permet de décrire la divisibilité de la matière, ouvrant sur une description modulaire.

A ce stade, soulignons l'application de théories mathématiques et de théories physiques à la chimie, en particulier celle de la thermodynamique, mais nous le verrons plus loin, également celle de la théorie quantique. Il s'agit donc de caractériser la particularité de l'approche de la chimie, malgré ces rapprochements. D'une part, trois propriétés furent importantes dans la description chimique : le poids et le volume atomiques, et la densité. D'autre part, la notion d'isotropie (mêmes propriétés dans toutes les directions) rassembla plusieurs éléments chimiques différents autour de cette similitude. Ensuite, l'apport de Sommerfeld permit de comprendre que « la position de l'élément à l'intérieur de sa période le caractérise mieux que

sa position dans le système périodique. » Ainsi, il est possible d'identifier une position particulière de l'élément dans sa période qui lui confère son unité, sa substance particulière.

Il devient alors nécessaire de comprendre la cohérence de cet ensemble d'éléments par une unification, une harmonisation, celle du système périodique, décrivant le fonctionnement de cet ensemble, ce qui sera fait par la théorie spectrale. Mais, d'un point de vue substantiel, l'hydrogène fut considéré philosophiquement comme l'unité commune à la matière. Bachelard écrivit : « qu'il est l'unité avec laquelle on fait des substances, il est aussi l'unité avec laquelle on fait des nombres. Une coopération du nombre et de la qualité explique ainsi l'univers de la chimie. »

Toutefois, il ajoute que à la généralisation peut succéder la particularisation : « Mais vient toujours un temps où l'expérience décompose le général et décèle, dans le phénomène global, des occasions de diversification. ». Ainsi, l'unité atomique fût à son tour décomposable à une échelle inférieure en fonction de sa couche électronique. Avec la compréhension du fonctionnement électrique (déplacement des électrons) autour de la notion de conductibilité émergea l'électronique qui programme ce déplacement. Philosophiquement, ces progrès sont intéressants car ils permettent d'associer la conception de la matière à un flux et non plus à une caractéristique telle que solide, liquide, gazeux ou plasma. En intégrant son substrat sous-atomique (ou subatomique), la matière devient conceptualisable en termes de rayonnement et radiation. L'ontologie fondamentale de la matière devient alors l'onde ou la particule.

Cependant, même si une ontologie fondamentale existe et qu'elle est nécessaire à l'existence d'autres ontologies, nous pouvons penser que ce n'est peut-être pas l'ultime, comme nous avons pu le constater avec l'atome dans l'histoire des sciences. Par ailleurs, le fondement n'est pas la totalité. Le fondement est ce qui permet de fonder. Avec la fondation peut émerger d'autres caractéristiques et ontologies. Ainsi, il est possible de convenir d'une construction ontologique sur la base de particules, mais dont la diversification est irréductible à cette base. Cette construction ontologique croisse par ordre de grandeur et se diversifie selon le modèle d'organisation : Les particules élémentaires et les antiparticules fonctionnent par émergence du vide quantique et annihilation, le noyau atomique par charge électrique, l'atome par période, la molécule par synthèse, la cellule par multiplication, les neurones par connexions synaptiques, les individus par reproduction, les sociétés par des systèmes d'appartenance, les civilisations par acquisition des sociétés antérieures. On distingue donc une diversité irréductible d'organisations en fonction de ses composantes spécifiques : des entités matérielles, des entités sensibles et intelligentes, des groupes, les résultats d'actions collectives. Ainsi, nous changeons

de paradigme. Il ne s'agit plus tant de chercher « l'identique dans le divers » que de comprendre les modes de diversification.

Or, le mode de diversification en chimie n'est pas le même que celui exprimé par le modèle standard de la physique des particules. En effet, la diversification des éléments chimiques est observable par la particularité des raies spectrales de chaque élément et le fonctionnement des raies est régi par émission ou absorption. Ainsi, la spectroscopie permet de reconnaître la trace des éléments lors de son passage dans un spectre électromagnétique (rayonnement). Face à cette diversité observable de raies, la structure fine des raies multiples est conceptualisée par Sommerfeld par fréquence et oscillation. Ainsi, la cohérence de cet ensemble est redonnée par les mathématiques. Par exemple, la formule de Rydberg permet de calculer les longueurs d'onde des raies spectrales et le passage à des niveaux d'énergie différents. Par ailleurs, l'analyse subatomique de la matière inclut donc la compréhension du fonctionnement des électrons et leur différenciation par un nombre quantique (principe de Pauli), les nombres quantiques étant associés à une quantité d'énergie. Ainsi, la compréhension du fonctionnement électrique éclaire la compréhension du fonctionnement périodique des éléments chimiques par une analyse à un niveau inférieur. De plus, il est possible de trouver une description harmonieuse de la matière en termes d'intensité d'énergie par variation entre haute et basse fréquence.

Pour conclure, avec Bachelard, nous observons surtout les interactions entre mathématiques, physique et chimie. Cependant, il est possible de spécifier que le chimiste développe une intuition des structures, des conformations des molécules et de leurs réactions qui ne nécessitent pas nécessairement le recours au niveau inférieur (particules élémentaires par exemple). Ce qu'il s'agit d'établir, c'est donc que la chimie correspond à un niveau nanoscopique qui est relativement autonome. Par exemple quand le chimiste voit une image (par diffraction X) d'une protéine, il peut en déduire toute sorte de propriétés possible et d'expériences possibles sans devoir faire de grands calculs ou sans devoir recourir à un niveau particulaire. Ce qui fait la spécificité de la chimie c'est l'autonomie de son niveau de description.

Annexe XI.

Des précisions terminologiques à la demande du jury.

Dans cette annexe, nous précisons certains termes importants dans la construction de cette thèse. Avant de les définir, précisons déjà ce qu'est une **définition**. Une définition correspond à un énoncé. Elle est soit intentionnelle, soit extensionnelle. La définition intentionnelle a pour finalité de **signifier**, en cernant ce qui appartient au terme et ce qui s'en distingue. La définition extensionnelle a pour finalité d'**énumérer**, en termes de partie et de tout, selon un type de divisibilité (spatial, temporel, catégoriel, etc.). Nous précisons donc ici plusieurs termes par une définition intentionnelle (significative par appartenance) et extensionnelle (énumérative par limite). Tout d'abord, nous définissons les notions d'**unification** et de **théorie du tout**, nous amenant ensuite à définir l'approche **réductionniste** et à préciser ses différentes formes : le réductionnisme méthodologique et le réductionnisme ontologique. Puis, nous précisons la formalisation de l'**explication scientifique** et les formes variées de **diversités** qui émergent de ce travail doctoral : diversité disciplinaire, conceptuelle, didactique, intrinsèque. Enfin, nous illustrons la notion de « **pratique scientifique** » par la diversité possible de finalités d'applications.

- 1) Unification des théories en science, théorie du tout, réductionnisme, monisme et pluralisme en philosophie.

L'unification des théories appartient à la pratique scientifique en physique théorique. Elle consiste à articuler, compléter ou élargir par globalisation plusieurs théories scientifiques. Elle permet donc d'élargir nos connaissances et notre compréhension du réel. L'exemple le plus

emblématique réside dans la construction des quatre équations de Maxwell, qui associe plusieurs lois physiques. Elle concerne donc une discipline spécifique : la physique théorique dont le fondement épistémologique repose sur la notion de loi, donc sur la compréhension des invariants dans l'univers.

La notion de **loi** existe aussi dans d'autres disciplines, notamment avec les notions d'évolution et d'adaptation qui caractérisent le vivant dans les sciences du même nom. Cependant, elle n'a pas la même signification en biologie qu'en physique. En biologie, la notion de loi renvoie au fonctionnement général d'entités dans un milieu conditionnant sa survie (l'adaptation) et la diversification de ces entités par mutations génétiques et environnementales (l'évolution). En physique, la notion de loi explique la capacité de trouver des invariants et de mettre en rapport deux entités différentes en fonction de ces invariants. Pour cela, il s'agit déjà de définir un référentiel en choisissant une quantité de point (un espace uni ou pluridimensionnel) et un système de coordonnées qui lie ces points, un champ scalaire. L'unification des théories est donc relative à la possibilité conceptuelle de faire correspondre mathématiquement des référentiels différents. La question de philosophie de la physique que pose l'unification des **théories physiques** est la limite de l'efficacité des théories physiques. L'efficacité d'une théorie est relative à son modèle explicatif. L'enjeu est donc d'harmoniser une description de l'extrêmement grand et de l'extrêmement petit. Nous laissons les physiciens théoriciens s'atteler à ce travail.

Pour le philosophe des sciences, il s'agit de faire remarquer que l'explication de la physique théorique est fondée sur l'espace-temps-matière. Mais rien ne dit que le réel en totalité s'identifie à ce dernier. Une théorie unificatrice n'est donc pas une théorie de tout. Une théorie unificatrice en physique théorique décrirait seulement les interactions fondamentales (force forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle). Le terme « théorie du tout » est donc parfois utilisé à mauvais escient pour décrire, en fait, une unification conçue uniquement dans les limites conceptuelles et méthodologiques de l'espace-temps-matière. Nous comprenons donc bien que les **théories d'une diversité disciplinaires** (les théories de la physique, de la biologie, de la psychologie) ne soient pas réductibles à une seule théorie a priori. Alors, pourquoi parler de théorie du tout ?

Une **théorie du tout** relève plutôt d'une prétention philosophique qui consiste à articuler une **diversité d'ordre de réalités**, une totalité reposant sur une ou plusieurs réalités fondamentales (monisme ou pluralisme ontologiques). Ainsi, l'idée de décrire le tout par une théorie physique suppose l'idée de **réduire la totalité de la réalité ou la réalité en totalité au moyen de**

concept forgés strictement dans les limites de la physique. L'approche est donc par essence **moniste**. Si l'unification de la physique est hautement désirable et fructueuse, l'identification entre cette unification et une théorie du tout relève d'un a priori philosophique de type moniste. A partir de ce choix philosophique, plusieurs positions émergent : soit le physicalisme, soit le réductionnisme méthodologique ou le réductionnisme ontologique. Il y a bien entendu encore des nuances au sein même de ces trois positions philosophiques que déclinent les philosophes qui les examinent, toutefois, nous donnerons une définition assez générale, globale, en nous référant au chapitre « Physicalisme, Réductionnisme et unité de la science ».⁷²

Tout d'abord, le **physicalisme** est défini par Elisabeth Pacherie comme étant « une version moderne de la doctrine matérialiste traditionnelle selon laquelle tout ce qui existe est de la matière en mouvement » et, qu'ainsi, toute chose pourrait être décrite par les sciences physiques. Ainsi, l'ensemble des disciplines scientifiques seraient résorbables dans l'une d'elles : la physique. Le physicalisme conceptualise deux thèses pour argumenter en faveur de cette position : d'une part, « la thèse dite de la « généralité de la physique », selon laquelle la physique est la science fondamentale de la nature », d'autre part, la seconde thèse postule que « les théories des autres sciences doivent être réductibles à des théories physiques ». Ainsi, tout est réduit à la physique. Concernant « le réductionnisme physicaliste strict, une théorie dans une science particulière sera scientifiquement acceptable si elle est réductible à la physique. » Autrement dit, la physique est universelle et les autres disciplines, particulières, sont résorbables à l'universalité de la **physique**. Le seul modèle explicatif acceptable selon cette position est donc « le modèle déductif-nomologique de l'explication scientifique de Hempel ».

A partir de cette idée de **réduction** de la totalité de la réalité à la physique, il est possible de distinguer le réductionnisme méthodologique et le réductionnisme ontologique. Le **réductionnisme méthodologique** consiste à simplifier jusqu'à trouver un élément ultime susceptible de reconstruire le tout. Si cette méthode est efficace pour formaliser des lois concernant le fonctionnement des processus naturels simples, elle s'avère simplificatrice et globalisante, ne permettant pas de rendre compte de la complexité du réel. Or, tout réduire à un seul « être » (un seul « étant ») un unique fondement, est justement l'idée du **réductionnisme ontologique**. Mais, si le réductionnisme méthodologique est une méthode qui permet de comprendre les processus simples, il s'avère souvent inefficace pour décrire les processus complexes. Le réductionnisme ontologique ne permet pas non plus d'intégrer les processus

72 Pacherie Elisabeth, « Chapitre II - Physicalisme et réductionnisme », dans : , *Naturaliser l'intentionnalité*. Essai de philosophie de la psychologie, sous la direction de Pacherie Elisabeth. Paris cedex 14, Presses Universitaires de France, « Psychologie et sciences de la pensée », 1993, p. 39-58. URL : <https://www.cairn.info/naturaliser-l-intentionnalite--9782130460589-page-39.htm>

complexes du réel en se fondant sur une seule réalité. Rien ne dit en effet que le réel est, par essence, **ontologiquement simple** (c'est-à-dire procédant d'un seul type d'élément de réalité. Ainsi, si l'on nous permet cette comparaison un peu hardie, le réductionnisme est à la philosophie des sciences ce que l'art abstrait est à l'art. L'art abstrait, à l'instar de l'un de ses praticiens, Kandinsky, ne retient que les couleurs et les formes, négligeant le reste comme des détails, le détail étant ici toutes les formes de complexité.

Mais le **monisme** peut aussi se rapporter à un autre fondement, comme la notion de matière pour le matérialisme, de nature pour le naturalisme, ou aux mondes des idées pour l'idéalisme.⁷³ Par ailleurs, le **pluralisme** existe aussi et il est également protéiforme. Nous avons cité les travaux de Stéphanie Ruphy à ce propos, et ceux d'Olivier Sartenaer, en particulier sur la notion d'**émergence**, mais aussi Leibniz en rapport à sa philosophie essentialiste fondée sur la notion de monade et le fonctionnalisme, en annexe. A chaque fois, nous avons tenté d'analyser l'apport et les limites de ces positions philosophiques, concluant en **l'arbitraire du choix entre monisme ou pluralisme**.

Conclusion : unifier n'est pas réduire.

Pour conclure, l'unification des théories au sein d'une discipline, par exemple en physique, est une bonne chose, puisqu'elle permet d'articuler diverses théories. Ainsi, elle donne plus de cohérence à cette discipline. Mais unifier des théories dans une discipline (unification), ce n'est pas la même chose que de réduire toutes les théories de toutes les disciplines à une seule (réduction). Il faut donc éclaircir la différence entre unifier et réduire. **Unifier** consiste à harmoniser, à « voir » sous un même point de vue, alors que **réduire** consiste à relier la totalité éventuellement complexe à un substrat simple voire élémentaire. Ainsi, unifier permet de gagner en cohérence, alors que réduire nous renvoie à une possible élimination.

La **réduction** est relative à un choix d'unité et à une simplification tronquant le réel de ses diversifications et formes de complexité. Le réductionnisme ontologique permet donc de décrire une réalité en cherchant à la simplifier parfois à outrance. Au contraire le pluralisme ontologique choisit la diversité qui-entend prendre en compte la complexité. Mais comment

⁷³ A ce propos, nous renvoyons vers l'annexe dédiée à la diversité de positions philosophiques et à la partie de la thèse consacrée à ces questions.

mettre en œuvre ce pluralisme ontologique ? Peut-être, justement, par l'unification, qui n'est pas la réduction.

L'**unification** peut se penser philosophiquement comme le dépassement d'une tension dialectique, comme dans une perspective hégélienne. Mais elle peut être vue également comme l'adoption d'un point de vue particulier à partir duquel une variété de connaissances prend une cohérence inédite. L'unification, par articulation (sans réduction) des disciplines que nous avons proposée dans notre thèse relève de cette manière de penser l'unification. Dans notre thèse, nous avons largement argumenté en faveur de son utilité et de sa spécificité. De même, la chimie est souvent réduite à une branche de la physique. Cependant, elle possède aussi sa spécificité.⁷⁴ Justement, cela nous invite à traiter plus en profondeur de la notion même d'explication scientifique.

2) La compréhension scientifique des processus : **nomologicit , boucles explicatives et alternative de clôture épistémologique.**

Pour préciser la notion d'explication scientifique, nous choisissons de nous référer à l'ouvrage d'Emmanuel Picavet *Approches du concret : une introduction à l'épistémologie (1995)*, où il est justement fait état des notions d'explication et de loi.

Tout d'abord, le modèle de l'explication scientifique est souvent vu comme celui de Hempel-Oppenheim. Ce modèle baptisé DN (Déductif-nomologique) possède ses propres contraintes, qui sont autant de limites. Le modèle DN vise des énoncés universels et un domaine non restreint, « non limité à un nombre fini d'objets » ou dérivés. Cette universalité ne lui permet pas d'atteindre la description de situations uniques, singulières, contingentes. La loi ne peut se concevoir que dans une classe de phénomènes doués d'une certaine **universalité**. De plus le modèle DN identifie le vrai et le prouvé (ce qui est problématique depuis notre connaissance des travaux de Gödel !). Cela nous amène à la **diversité des modèles explicatifs**.

La pertinence de l'**explication** est relative au choix de **ce que l'on veut expliquer**. La **clôture terminologique** d'une explication est identifiable en fonction d'un **explanandum**, ou énoncé, qui décrit ce qu'il s'agit d'expliquer, et un **explanans**, qui regroupe tous les énoncés explicatifs.

⁷⁴ Cf. Annexe sur la spécificité de la chimie, science des matériaux.

Ensuite, la **forme de l'explication** est soit **prédictive** (du présent vers le futur) en fonction d'une **tendance** (évolution) ou d'une **régularité** (similitude), soit **historique** (du présent au passé par reconstitution). Dans ce sens, l'explication justifiée par des causes, **causale**, permet la **prédictibilité**, expliquant un ensemble de phénomènes par un autre.

Cependant, d'une part, elle pose la question de la **cause première**. D'autre part, elle sous-tend un déterminisme. Or, tout n'est pas déterminé et donc déterminable. Il existe des degrés de liberté, de l'imprévisible, de l'impréconcevable (selon le terme de Kauffman) et de l'improbable. L'explication causale est donc finalement **probabiliste**, en fonction d'une détermination des possibles. En revanche, l'origine de **l'explication historique** est relative à l'objet (ou sujet) de l'histoire (le cosmos, le vivant, l'individu), et à une action motrice en fonction d'un principe (la thermodynamique, la phylogénèse, les interactions sociales). L'explication historique est donc aussi **arbitraire**.

En outre, l'origine de **l'explication prédictive**, déterministe, et l'origine de **l'explication probabiliste**, donc indéterministe, réfèrent toujours à des **conditions initiales**, qui impliquent **une diversité de boucles explicatives** (la cause première de la cause seconde), une succession de fins, où l'origine est relative à un **principe, problématisé, et au choix d'une méthode** (par exemple, expliquer l'univers par des lois, la vie par ses fonctions ou la pensée par ses connexions neuronales). La **probabilité** est, elle aussi, relative à un cadre conceptuel, en fonction d'un **modèle**.-Rappelons donc que « la probabilité n'a de sens que par référence à une expérience aléatoire et à un univers des possibles, (...) », limité. Rappelons aussi que des descriptions évolutionnistes ne valent que si elles sont instructives, c'est-à-dire « non tautologiques » et « non finalistes », si elles rendent compte d'un « « mécanisme causal », rendant leur conclusion prévisible dans les termes de la théorie retenue. », qui peut porter sur des « classes de fait plus ou moins étendues ». Ensuite, il convient de distinguer **finalisé de finalité**, ce que fait la cybernétique. Oppenheim permettra de préciser que le **comportement finalisé** est « contrôlé par **rétroaction** ». Il sous-tend donc un **déterminisme**, alors que la **finalité** est la volonté qui précède l'action : l'**intention**.

Enfin, la tendance commune dans l'univers, dans la matière, dans la pensée, dans les sociétés est le double mouvement de formation et de déformation. Ainsi, on pourrait peut-être penser cela en utilisant l'idée philosophique de métamorphose (cela ne serait pas nouveau, puisque cela a été fait par Goethe dans sa philosophie de la nature) la **métamorphose**, fondamentalement opposée à la conception passée, celle d'un univers et d'espèces stables, statiques. Une description en termes de **processus**, d'événements, de processus naturels, nous

semble donc plus juste, car elle permet de constater des bifurcations, des seuils, des paliers, des **fins de périodes**, dans un **mouvement continu**. Ce mode de description est aussi plus juste en anthropologie, car il est aussi possible d'observer des **paliers civilisationnels**.

Ainsi, deux **clôtures épistémologiques** émergent soit l'une **fermée**, déterministe, finalisée en fonction des conditions initiales, soit l'autre **ouverte**, indéterminée, où il n'est possible que d'envisager des probabilités, qui ne sont pas tous les possibles, car il existe de l'impréconcevable.

Le choix de l'une ou de l'autre des clôtures épistémologiques sous-tend des conséquences métaphysiques tendant soit vers une orientation déterministe, soit vers une orientation indéterministe.

- Une vision déterministe totale, fermée, permet de saisir les invariances dans le réel. Elle donne une description **nécessaire**. Elle ouvre sur une philosophie du temps **éternaliste**.
- Une vision indéterministe, ouverte, donne une description circonstanciée du réel. Sa capacité explicative est a posteriori (historique) en fonction du présent et des tendances possibles. Elle ouvre potentiellement sur une philosophie du temps **présentiste** questionnant sur le sens de la **localité**.

Ces deux **philosophies du temps** peuvent se retrouver en extrapolant le déterminisme sous-jacent de la relativité générale et le probabilisme de la mécanique quantique. Ainsi, l'explication relativiste de l'univers est déterministe et éternaliste, alors que l'explication quantique de l'univers laisse un univers ouvert, indéterminé, et aléatoire. Concilier ces deux théories permettrait donc aussi d'arriver à une conception nuancée expliquant qu'il y a à la fois des invariants dans l'univers, donc une part de **déterminisme**, ce qui est nécessaire et inéluctable (les conditions initiales) et des degrés de liberté, donc également une part d'**indéterminisme** où il est important de considérer l'influence de la mesure.⁷⁵

3) Une diversité de tout : de la connaissance à l' « instrumentabilité » du réel.

⁷⁵ A ce propos nous renvoyons vers l'article de Anouk BARBEROUSSE, « Les conditions de possibilité de la mesure », Cahiers philosophiques, 2013/4 (n° 135), p. 7-22. DOI : 10.3917/caph.135.0007. URL : <https://www.cairn.info/revue-cahiers-philosophiques1-2013-4-page-7.htm>

Dans cette thèse, à propos de l'ambiguïté d'une théorie du tout, nous avons expliqué que la notion même de **tout** est relative :

- a) L'idéal d'une totalisation des connaissances scientifiques, composée de ses parties, les disciplines, est **inachevable**, puisque les connaissances, comme les disciplines, ne cessent d'augmenter avec de nouveaux formalismes, de nouveaux modes d'expérimentation et de nouvelles recherches interdisciplinaires. Il existe donc une diversité disciplinaire, conceptuelle et instrumentale.
- b) L'idéal d'un tout conceptuel, en fonction d'un fondement philosophique, ou d'axiome est **inadéquat**, puisqu'il ne peut s'auto-justifier par lui-même. Il existe une diversité de positions philosophiques et métaphysiques. Et le choix d'une de celles-ci en particulier relève d'une option.
- c) L'idéal d'un tout rationnel. Il nécessite une diversité d'explications, de mode d'articulations de celles-ci en fonction du choix d'une conception de la réalité élémentaire et d'un mode de justification de ce choix. Cependant, ce tout ne cernerait que ce qui a trait au raisonnement, à l'argumentation, à l'esprit logique, et non à d'autres facultés comme celle sollicitant la créativité ou la contemplation, par exemple. Ce tout est donc **arbitraire**.
- d) L'idéal d'un tout observable, empirique, par la diversité expérimentale, se heurte, d'une part, à la question de catégorisation (diversité d'objectivités) et, d'autre part à l'intentionnalité (diversité de subjectivités). De plus, elle pose la limite des connaissances aux limites de l'instrumentalisation. Par exemple, nous n'arrivons pas, pour le moment, à mettre en évidence la matière noire dans des expériences, afin de la caractériser par des propriétés. Peut-être un jour cela sera résolu. Mais, un autre exemple de **non-observabilité** du tout est la physique quantique. En effet, plusieurs états quantiques superposés se réduisent à un seul état quand ils sont observés. Ex : réduction du paquet d'onde, intrication quantique, etc.

Nous avons donc explicité la **diversité disciplinaire**, des sciences, en particulier en fonction de l'objet de recherche variable. Nous avons aussi explicité la **diversité de positions philosophiques** sous-jacentes à cette théorie du tout : le monisme, le pluralisme, l'idéalisme, l'essentialisme, le matérialisme, le fonctionnalisme, le pragmatisme, tous ces « isme » de la philosophie, qui ouvre sur la **diversité de fondements et de métaphysiques**. Ensuite, nous

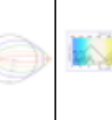
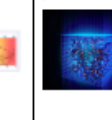
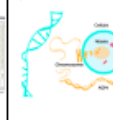
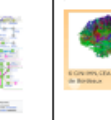
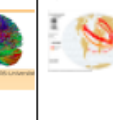
avons aussi abordé le désir (irrationnel) d'un tout rationnel, en particulier avec le cognitivisme et computationnalisme et ses limites formelles. Nous avons enfin abordé l'idéal d'un tout empirique, qui est davantage celui qui nous meut. Nous avons donc mis en lumière la diversité de **processus naturels et artéfactuels**.

Cependant, ce tout empirique demeure en partie **impréconcevable**, comme l'explique Kauffman. De plus, une interrogation demeure **incernable** dans ce tout empirique, ce qui meut l'individu : les désirs, les croyances, les valeurs. Alors, ce qui est plus surprenant, ce n'est pas tant de **connaître**, puisqu'une connaissance s'explique et se justifie par des arguments rationnels, que le fait de croire. La **croyance** repose sur la confiance, et la confiance provient d'une absence de méfiance, par une méconnaissance du fait qu'on peut nous tromper ou nous nuire. La croyance suppose aussi de questionner la notion de **crédibilité**. A l'heure des fakes news, une philosophie des croyances est peut-être à approfondir⁷⁶. Enfin, comme nous l'avons vu, la quête de connaissances scientifiques renvoie elle-même à des valeurs. Elle peut être animée par la quête de vérité. Cependant, ce n'est pas la seule quête des scientifiques, et plus généralement des humains. Elle pose donc aussi des questions sur la **spécificité anthropologique**. Par ailleurs, pour être financée, la recherche théorique doit pouvoir promettre parfois des applications « utiles », c'est ce que nous nommons la **pratique scientifique**, par-delà la diversité des modes d'expérimentation.

76 A ce propos, nous renvoyons au livre Philosophie cognitive, 2004, Ophrys, sous la direction de Elisabeth Pacherie, Joëlle Proust, dans lequel la diversité des formes de croyances est notamment abordé.

Conclusion :

Face à la diversité de tout, la **diversité intrinsèque**, structurelle,
par *modes de fonctionnement et mode de divisibilité*.

Des structures en réseau cartographiable											
L'unité mesurable (grandeur).	Le système spatio-temporel.	Le système quantique	Le système nucléaire	Le système périodique des éléments	Les systèmes galactiques autour d'un trou noir et les systèmes planétaires autour d'une étoile.	Les systèmes planétaires.	Le système cellulaire.	Le système métabolique.	Le système cérébral.	Un système économique et social mondialisé.	Le système civilisationnel.
Le mode de fonctionnement particulier (processus).	Alternance de formations et de déformations par interaction entre des matières (baryonique et exotique) et des énergies (électromagnétique et sombre).	Émergence et annihilation de particules.	Fission/fusion nucléaire.	Les raies d'émission/raies d'absorption	L'effet attractif des trous noirs et la nucléosynthèse stellaire.	Érosion et sédimentation	Division et multiplication des cellules	Assimilation et élimination de macromolécules par réactions enzymatiques et hormonales.	Connexion et déconnexions neuronales par zones (aire ou région) cérébrales.	Loi de l'offre et de la demande.	Apparition et disparition de modèles sociétaux.
Le mode de calcul	Les dimensions	Les forces fondamentales	Numéros atomiques/nombres	Les raies spectrales	Gravité et antigravité.	La stratigraphie	Le code génétique (génomique)	L'organisme ¹²	L'aire cérébrale.	La répartition monétaire.	Évolution géopolitique.

(divisibilité)			ombres quantiques								
La discipline	La cosmologie	La physique des particules ou des hautes énergies.	La physique subatomique	La chimie	L'astrophysique	Les sciences de la Terre, géologie et climatologie.	La génétique	La biologie structurale.	Les neurosciences	Les sciences économiques et sociales.	Une anthropologie technopolitique.

NB : Lien de dépendance, non-réciproque, à la structure antérieure (substrat) et spécificité émergente.

Une diversité épistémologique relative au <i>fondement explicatif</i> .							
L'objet	Les lois	Les substances (composés)	Les fonctions	Les neurones	Les individus	Les sociétés	Les modèles civilisationnels.
Le fondement explicatif	Symétrie (invariants) et asymétrie (aléatoire)	Les réactions chimiques par modélisation moléculaire	Les conditions nécessaires.	La computation.	Les représentations mentales	La composition de l'échantillonnage	La caractérisation des ères par l'usage d' artefacts comme instrument de puissance. ¹³
La discipline	La physique théorique.	La chimie théorique.	La biologie théorique.	Les neurosciences et sciences cognitives.	Sciences humaines et éthologie.	Sciences économiques et sociales	L'anthropologie : « science qui étudie les caractéristiques anatomiques, biologiques, culturelles et sociales des êtres humains. Appliquée à l'archéologie, elle s'intéresse aux restes humains et au contexte dans lequel ils sont découverts ». ¹⁴

4) La pratique scientifique : applications et commercialisation des savoirs.

Nous ne nous étendrons pas sur cette question qui relève de la sociologie des sciences. Toutefois, il est important de replacer la science dans son contexte. La science est une activité humaine au sein d'une société qui la permet, tant financièrement qu'axiologiquement, tant qu'elle est animée par un **esprit critique** qui implique la tolérance d'une diversité de pratiques et la quête d'objectivité par la production de connaissances rationnelles. Ainsi, la production de connaissances scientifiques n'est pas décorrélée de la société, au contraire.

De même, la connaissance théorique n'est pas sans incidence pratique. Par exemple, la connaissance du fonctionnement subatomique a permis l'émergence d'applications nucléaires

77 Source de l'image, univers observable <https://science.nasa.gov/observable-universe>
 Cartographie de l'univers observable
https://mapoftheuniverse.net/?fbclid=IwAR3EqNe7wffRRq2KleprJD865T90_jm3kf1M0Pot2jYoZVW7mVZfJ6HALS0
 modèle Lambda CDM : https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/univ_evol.html
 77 Source de l'image, Équilibration thermique des modes de bord Hall quantiques entiers et fractionnaires dans le graphène : https://iramis cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3489
 77 Source de l'image, le modèle atomique de Sommerfeld : <https://energie-nucleaire.net/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire/atome/modeles-atomiques/modele-atomique-de-sommerfeld>
 77 Source de l'image, la classification des types spectraux : <http://www.astrosurf.com/luxorion/spectro-classification.htm>
 77 Source de l'image, les étoiles noires : <https://www.pourlascience.fr/sd/astrophysique/les-etoiles-noires-des-astres-venus-du-fond-des-ages-7267.php>
 77 Source de l'image, l'échelle des temps géologiques : <https://wp.unil.ch/geoblog/2012/07/echelle-des-temps-geologiques/>
 77 Source de l'image sur la place de la génétique dans le développement cellulaire : <https://www.genetique-medicale.fr/la-genetique-l-essentiel/les-notions-cles-de-la-genetique/article/les-notions-cles-de-la-genetique-medicale>. Pour une représentation en réseau <https://theses.hal.science/tel-01086134/document>
 77 Réseau métabolique simplifié https://en.wikipedia.org/wiki/Metabolic_network
 Pour approfondir la discipline : <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782804152369-biochimie-structurale-et-metabolique>
 77: Source de l'image, cartographier le connectome : https://joliot cea.fr/drf/joliot/pages/actualites/actualites/actualites_scientifiques/2017/cartographier-le-connectome-humain.aspx
 Pour en savoir plus sur le connectome : <https://www.gin.cnrs.fr/fr/recherche/axe3/>
 77 Représentation des flux mondiaux : <https://journals.openedition.org/mappemonde/7558>
 77 L'historique de John B. Sparks en 1932
https://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~200375~3001080:The-Histomap-?sort=Pub_List_No_InitialSort%2CPub_Date%2CPub_List_No%2CSeries_No&qvq=q:histomap;sort:Pub_List_No_InitialSort%2CPub_Date%2CPub_List_No%2CSeries_No;lc:RUMSEY~8~1&mi=8&trs=9
 77 Pour aller plus loin sur le lien corps/cerveau : <https://www.college-de-france.fr/editions/lecons-inaugurales/systeme-immunitaire-et-dynamique-du-cerveau-9782213720630>
 77 Confer la caractérisation des ères préhistoriques par l'INRAP : <https://frise-chronologique.inrap.fr>
 77 <https://www.inrap.fr/les-sciences-de-l-archeologie/L-anthropologie>

qui produisent l'énergie dont nous avons besoin pour nous chauffer, mais qui aussi potentiellement peuvent nous détruire par l'arme atomique. La connaissance a donc toujours été un Janus, à double visage, comme le sera l'intelligence artificielle selon les usages qu'il en sera fait.

C'est pour cela qu'il est important de nommer la diversité possible des pratiques scientifiques en fonction de leurs applications. Par exemple, la connaissance en génétique permet de produire des vaccins, comme les nouveaux vaccins à ARN messager utilisés contre les formes de coronavirus. La **finalité de cette application** que nous venons de citer est donc le soin. Les thérapies géniques ont également des **visées curatives**. Mais, les applications peuvent être simplement basées sur le fonctionnement économique libéral de **l'offre et de la demande**, et avoir **une finalité lucrative**. Nous pensons aux FIV, GPA, PMA, etc. Si cela peut satisfaire certains, d'autres pâtissent parfois de ces pratiques. A ce propos, nous avons déjà cité le problème du marché des ventres ou de la vente d'organes... Les progrès scientifiques, techniques et la diversité possible d'applications devraient donc être encadré par une meilleure **justice sociale**.

Enfin, nous connaissons tous aussi les **dégâts environnementaux** liés à la pollution lumineuse, à la pollution des eaux et des sols, à l'extraction de minerais, à la surproduction ou même à l'activité aérospatiale, qui laisse ses déchets en orbite. Alors doit-on faire tout ce que l'on sait et peut faire ? Si **l'éthique de la Recherche** permet de poser des jalons dans l'activité de la recherche scientifique à propos des « **bons** » **procédés**, il reste à penser une **éthique de la vie**⁷⁸, sous toutes ses formes, et **du respect de notre environnement**, propice à la vie par ces éléments : l'eau, l'air, la terre (humus), le climat. Ainsi, plutôt que de parler de sobriété, il semblerait juste de **resacraliser et sanctuariser** ce qui est essentiel à la **survie du vivant** et de construire une société humaine moins polluante, donc plus **saine**, pour elle-même et pour la biodiversité. Alors, peut-être qu'une réflexion entre éthiciens du vivant, de l'environnement et anthropologues éco-culturels serait intéressante pour repenser la notion même de **nature**, dont la Physique n'a pas le monopole. Nous voyons ici apparaître la nécessité de repenser les liens entre philosophie de la nature, sciences et éthique. Un champ important pour la recherche contemporaine.

78 A ce propos, nous renvoyons à l'ouvrage Une éthique pour la vie Approches interdisciplinaires (philosophie, médecine, droit, sociologie) coordonné par Claudie Lavaud, édition Seli Arslan, 2007.

PORTFOLIO

Acquisition, production et diffusion de connaissances durant la thèse.

1. Acquisition de connaissances : formations suivies pendant la thèse.

2022 – Préparation à la soutenance de thèse - Université de Paris
2022 – Les nouveaux métiers de l'environnement - Université de Paris
2022 – Publier un article scientifique - Université de Paris
2021/22 Formation en anglais - Université de Paris
2020 - Formation portfolio- Université de Paris

2018 – Auditrice des cours sur « l'éthique de la Recherche »

Proposés en ligne par l'Université de Lyon avec attestation de réussite.

- Partie 1. La vision européenne et française de la recherche.
- Partie 2. Les controverses autour des technosciences.
- Partie 3. Les nouvelles figures de la science.

Durée : 15h. Détail de la formation :

<https://www.fun-mooc.fr/courses/course-v1:universite-lyon+91001+session01/info>

6 septembre 2018 – Auditrice du Colloque national « Le plus important »

au Collège de France. Présentation de proposition pour l'engagement des chercheurs dans la diffusion de la culture scientifique Lien vers le site : <https://leplusimportant.org/wp-content/uploads/2019/07/CP-Colloque-Démarche-scientifique-Collège-de-France-Leplusimportant-6-septembre.pdf>

26 mai 2018 – Auditrice au Salon Viva technology

Présentation de l'ordinateur quantique au stand IBM

Lien vers le site : <https://vivatechnology.com>

2018 – Auditrice des cours en « Philosophie des sciences » Master LOPHISS

Université de Paris UE Histoire et philosophie des mathématiques dirigée par P. Crozet

UE Histoire et philosophie de la Physique dirigée par N de Courtenay

Durée : les lundis et mardis matin du second semestre.

Site : <https://hps.master.univ-paris-diderot.fr/content>

2017 – Auditrice des cours sur une introduction à la « physique des particules,

dispensés en ligne par l'Université de Lausanne autour de six thèmes avec obtention de la certification.

- Concepts de la physique des particules et articulation.
- Propriétés du noyau atomique.
- Réaction des particules, interactions fortes et faibles.
- Accélérer et détecter des particules et mesurer leurs propriétés.
- Masse des objets subatomique et intervention du champ de Higgs.
- Lien entre physique des particules et astrophysique.

Durée : sept semaines .Lien vers le cours : <https://www.coursera.org/learn/physique-particules>

Les 9 et 10 mai 2017 – Auditrice des conférences sur la Gravité Larsim CEA.

Lien : http://irfu.cea.fr/dphp/Phoce/Vie_des_labos/News/index.php?id_news=3518

18 avril 2017 – Auditrice des conférences sur le thème « le modèle standard et au-delà »

organisée par l'Académie des Sciences. Lien : <https://www.academie-sciences.fr/fr/Colloques-conferences-et-debats/physique-des-particules.html>

21 Mars 2017 – Auditrice à la journée de formation « Médiation, communication et journalisme scientifiques » à l'Université de Paris-Saclay.

- Identifier de nouveaux métiers ouverts aux docteurs
- Connaître les besoins en compétences
- Comprendre le transfert de compétences

Détail de la journée : <https://www.adum.fr/psaclay/formations.pl?mat=137974>

Du 03 au 05 Novembre 2016 – Auditrice du « Colloque international de Philosophie des Mathématiques, FPMW8 », organisé par le GDR PhilMath dont les objectifs sont les suivants.

- Développer les recherches sur les fondements de mathématiques et l'interdisciplinarité entre philosophie des mathématiques et de la logique.
- Promouvoir les questions en métaphysique et philosophie du langage à propos des mathématiques.
- Promouvoir le développement de la philosophie pratique mathématique historique et didactique.

Lien vers le site de l'évènement : <https://fpmw8-2016.sciencesconf.org>

13 octobre 2016 – Auditrice d'une conférence sur l'histoire et la philosophie de la chimie

Lien : <http://www-test.sphere.univ-paris-diderot.fr/spip.php?article1993>

11 octobre 2016 – Auditrice des conférences sur le thème « Astronomie et Cosmologie : notre vision de l'Univers et son destin » organisées par l'Académie des Sciences.

Lien : https://www.academie-sciences.fr/pdf/conf/colloque_111016.pdf

2016-2017 – Auditrice des cours du Diplôme d'Université « Explorer et Comprendre l'Univers » à l'Observatoire de Paris avec trois composantes.

Connaissances de base en astronomie et astrophysique.

Panorama de l'actuel de la recherche dans ces disciplines.

Stage pratique à l'Observatoire de Haute Provence, OHP.

Durée : 2h hebdomadaire pendant un an + Stage d'une semaine.

Lien : <https://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/>

2. Productions intellectuelles et responsabilités collectives.

2.1 Productions intellectuelles :

Juillet 2022 – Participation à une expédition scientifique en mer méditerranée avec l'association Expé Méd dont l'une des activités est de la science participative en vue de l'acquisition de données sur la pollution plastique.

<https://www.expedition-med.org>

Du 21 au 23 Novembre 2018 - Oratrice au VIIème symposium international sur la philosophie de la Nature à l'université Australe de Valdivia au Chili. Communication sur la notion de loi.

31 mai 2018 – Oratrice lors d'une conférence-débat sur l'intelligence artificielle organisée par La Biennale de Paris ENDA au Living Lab.

Du 01 au 03 Novembre 2017 – Oratrice au VIème symposium international sur la philosophie de la Nature à l'université El Bosque à Bogota en Colombie. Communication sur la notion d'émergence.

2017 – Rédactrice d'une synthèse d'un ouvrage de philosophie des sciences sur le site lesphilosophes.fr

2.2. Responsabilités collectives :

2018 – Mandat d'un an de représentante des doctorants pour le laboratoire SPHERE

05 octobre 2018 - Membre du comité d'organisation du salon PhD Talent Career

Lien vers le site : <https://careerfair.phdtalent.org>

Du 06 au 08 Juin 2018 – Membre du comité d'organisation de la 4ème conférence de l'AIRDHSS, Association Internationale de Recherche en Didactique de l'Histoire des Sciences Sociales

Programme complet : [http://www.cnfg.fr/wp-](http://www.cnfg.fr/wp-content/uploads/2018/05/Citoyennete_identite_alterite_Pg_juin_2018_pagination_simple.pdf)

[content/uploads/2018/05/Citoyennete_identite_alterite_Pg_juin_2018_pagination_simple.pdf](http://www.cnfg.fr/wp-content/uploads/2018/05/Citoyennete_identite_alterite_Pg_juin_2018_pagination_simple.pdf)

3. Activités de diffusion des connaissances.

Septembre 2022 – Participation au Festival Lumexplore, film d'exploration scientifique et environnemental, à La Ciotat.

Lien vers le site internet : <https://lumexplore.fr>

Août 2022 – Participation aux Journées d’Été des Savoirs Engagés et Reliés, JESER, à l’ENS de Lyon.

Lien vers le site internet : <https://sciencescitoyennes.org/journees-dete-des-savoirs-engages-et-relies-27-28-29-aout-a-lyon/banniere-jeser-rs-5/>

Juin 2020 – Marraine pour « Les Maths en Scène ».

- Préparation d’un lycéen au concours « Eloquensciences »
- Lien vers le site : <https://lesmathsenscene.fr>

Du 5 au 13 octobre 2019 - Reporter pour La fête de la Science

Du 6 au 14 octobre 2018 - Reporter pour La fête de la Science

Reportages et diffusion sur les réseaux sociaux d’évènements et informations scientifiques

Lien vers le site : <https://www.fetedelascience.fr>

Août 2018 – Auditrice de conférences au Festival d’astronomie de Fleurance et promotion de l’évènement sur les réseaux sociaux.

Août 2018 – Animatrice pour l’association Spacebus

- Observation astronomique
- Valorisation de la place de la femme dans la recherche scientifique
- Sensibilisation à la connaissance scientifique et aux questions environnementales
- Lien vers le site de l’association : <https://spacebusfr.wixsite.com/spacebusfrance>

Compétences développées :

- Définir un sujet, effectuer des recherches, mobiliser et synthétiser des connaissances.
- Respecter des normes rédactionnelles et temporelles.
- Rédaction écrite et expression orale.
- Adapter son discours au public ciblé.
- S’exprimer devant ses pairs.
- Entendre les critiques, réagir et argumenter.
- Élargir son champ de réflexion.
- Travailler, seule ou en groupe, sur un projet pédagogique, sur la création et la diffusion de contenus adaptés à différents publics, organiser des évènements.
- Comprendre divers enjeux et identifier le fonctionnement d’organisations.