HAL
open science

La pluralité des interprétations d'une théorie scientifique : le cas de la mécanique quantique

Thomas Boyer

To cite this version:

Thomas Boyer. La pluralité des interprétations d'une théorie scientifique : le cas de la mécanique quantique. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2011. Français. NNT : . tel-00667791

HAL Id: tel-00667791

https://theses.hal.science/tel-00667791v1

Submitted on 8 Feb 2012

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

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

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne
IHPST

Thèse

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

présentée et soutenue publiquement
le 2 décembre 2011 par

Thomas Boyer

La pluralité des interprétations d'une théorie scientifique : le cas de la mécanique quantique

---

Sous la direction de Jacques Dubucs et d'Anouk Barberousse

Membres du Jury :

Anouk Barberousse	professeure à l'Université de Lille 1
Jacques Dubucs	directeur de recherches au CNRS, IHPST (Paris 1, ENS, CNRS)
Alexandre Guay	maître de conférences à l'Université de Bourgogne
Franck Laloë	directeur de recherches au CNRS, LKB (ENS, CNRS)
Stéphanie Ruphy	maître de conférences HDR à l'Université de Provence

Rapporteurs :
Philip Kitcher (professeur à l'Université de Columbia, New-York) et Stéphanie Ruphy

Année 2011

Sommaire

Remerciements **7**

Introduction **9**

I Les interprétations de la mécanique quantique **15**

1 Interpréter une théorie scientifique **19**
Introduction 19
1 L'interprétation en logique et en mathématiques 20
2 L'interprétation d'une théorie physique 22
2.1 Difficultés de l'interprétation d'une théorie physique 23
2.2 À quoi sert une interprétation ? 25
2.3 Définition d'une interprétation : un aperçu historique 28
2.4 Une proposition : l'interprétation d'une théorie physique fournit une image du monde 31
2.5 Quelques questions générales sur l'interprétation d'une théorie 35
Conclusion 38

2 Présentation de plusieurs interprétations quantiques **41**
Introduction 41
1 L'interprétation orthodoxe 43
1.1 L'interprétation orthodoxe contemporaine des manuels 44
1.2 Le problème de la mesure 52
1.3 Une interprétation orthodoxe minimale 54
1.4 L'interprétation historique de Copenhague 57
1.5 Conclusion 60
2 L'interprétation de Bohm 61
2.1 Présentation générale 62
2.2 Formulation de la mécanique bohmienne 63
2.3 L'image bohmienne du monde 64
3 L'interprétation des mondes multiples d'Everett 67
3.1 Formulation de la théorie 67
3.2 L'image everettienne du monde 70
3.3 Conclusion de la présentation des différentes interprétations . 72

4 En quel sens ces interprétations sont-elles équivalentes ? 72
4.1 Des prédictions probabilistes, à partir d'une même fonction d'onde 75
4.2 La réduction de la fonction d'onde entraîne-t-elle une différence prédictive ? 77
4.3 Des prédictions à propos de faits différents 83
4.4 Une équivalence empirique 86
4.5 Conclusion sur l'équivalence entre les interprétations 89
Conclusion 89

3 Différentes conceptions de ce que sont les interprétations quantiques 91
Introduction 91
1 Les interprétations quantiques selon la conception syntaxique des théories 92
1.1 Présentation de la « Conception Dominante » 92
1.2 La Conception Dominante permet-elle de rendre compte de la théorie de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations ? 98
1.3 Présentation de la conception de Nagel 106
1.4 La conception de Nagel permet-elle de rendre compte de la pluralité des interprétations quantiques ? 109
2 Les interprétations quantiques selon la conception sémantique des théories 112
2.1 Présentation de la conception sémantique des théories 113
2.2 La conception sémantique permet-elle de rendre compte de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations ? . . . 118
Conclusion 122

II La pluralité des interprétations quantiques d'un point de vue pratique 123

4 Les interprétations quantiques dans la pratique scientifique 127
Introduction 127
1 Comment la pratique scientifique peut dépendre de l'interprétation quantique 129
1.1 Le langage et les énoncés acceptés 131
1.2 Les questions significatives 132
1.3 Motifs d'explication 141
1.4 Les informateurs crédibles 143
1.5 Expérimentation et observation 144
1.6 La notion de « pratique suggérée par une interprétation » . . 145
1.7 Existe-t-il une pratique interprétativement neutre ? 146
2 Les divers rôles en pratique d'une interprétation dans la recherche . . 150
2.1 Dans la production d'un travail 151
2.2 Dans la publication d'un travail 152
2.3 Formalisation 153

3 La pluralité des interprétations dans la pratique scientifique 154
3.1 Exemples dans le domaine du calcul quantique 155
3.2 Exemples dans le domaine des fondements de la mécanique quantique : autour de la question des « variables cachées » . . 158
3.3 Exemples de travaux en collaboration 160
3.4 L'interprétation utilisée dans la publication 161
Conclusion 163

5 L'unité de la mécanique quantique d'un point de vue pratique 165
Introduction 165
1 L'unité en pratique de la mécanique quantique selon Kitcher (1993) . 169
1.1 La « pratique consensuelle » selon Kitcher 170
1.2 Quelle est la pratique scientifique consensuelle en mécanique quantique ? 171
1.3 Remarques sur l'unité en mécanique quantique selon Kitcher . 177
2 Proposition d'une unité fondée sur une relation de fécondation entre les travaux 181
2.1 Les limites d'une conception de l'unité fondée sur un consensus 182
2.2 Définition d'une relation de fécondation 185
2.3 Définition d'une unité par la fécondation 188
2.4 Commentaires sur cette notion d'unité par la fécondation . . . 191
3 L'unité par la fécondation de la mécanique quantique 196
3.1 La compréhension et la réutilisation des articles 197
3.2 Exemples de relations de fécondation avec des interprétations différentes 198
Conclusion du chapitre 205

III La pluralité des interprétations : une approche normative par l'épistémologie sociale 207

6 Les scientifiques devraient-ils partager leurs découvertes intermédiaires ? 213
Introduction 213
1 Définition et exemples de résultats intermédiaires 215
2 Quelques explications possibles 219
3 Un modèle de recherche séquentiel 221
3.1 Un modèle formel, en épistémologie sociale 221
3.2 Présentation du modèle 222
4 Résultats du modèle 227
4.1 Ce que la société veut 227
4.2 Cas du modèle avec l'hypothèse de temps fini 227
4.3 Cas du modèle avec l'hypothèse de chaîne finie 229
4.4 Quand devrait-on ne pas publier les étapes intermédiaires ? Deux modifications du modèle. 230

4.5 Discussion des résultats 233
Conclusion 235

7 La pluralité des interprétations est-elle bonne d'un point de vue pratique ? 237
Introduction 237
1 Réinterprétation des hypothèses du modèle du chapitre 6 240
1.1 Une chaîne d'étapes 240
1.2 Des écoles interprétatives 241
1.3 Publication 241
1.4 Récompense 244
1.5 Fin du jeu 245
2 Le risque de division entre les écoles 246
2.1 Le problème 247
2.2 Résultats du modèle réinterprété 248
2.3 Division des écoles et unité par la fécondation 249
2.4 Quelles sont les divisions néfastes pour la communauté ? . . . 250
2.5 Le cas de la mécanique quantique 250
2.6 Une limite au pluralisme 251
Conclusion 252

Conclusion 253

Annexe — Preuves des théorèmes du chapitre 6 257
1 Preuve du théorème 1 de la section 4.2 257
2 Preuve du théorème 2 de la section 4.3 260
3 Preuve du théorème 3 de la section 4.4.1 263
4 Preuve du théorème 4 de la section 4.4.2 265

Bibliographie 267

Index des noms propres 280

Liste des figures 282

Liste des tableaux 283

Remerciements

Ce fut un plaisir de réaliser ma thèse pendant ces trois années sous la direction d'Anouk Barberousse et de Jacques Dubucs, au sein de l'IHPST.

Je tiens tout d'abord à remercier Anouk Barberousse pour ses relectures critiques, ses encouragements, ses conseils et pour sa grande disponibilité. J'ai réellement apprécié la façon dont elle a dirigé mon travail, en pointant sans complaisance les limites de mes arguments, tout en me laissant libre de la façon dont je pouvais y remédier et rechercher de nouvelles pistes de réflexion. Je mesure aujourd'hui combien ma formation philosophique lui doit. Si des qualités doivent être trouvées dans mon travail, nul doute qu'elles ont été forgées par sa critique, toujours pédagogique. Mes remerciements vont à Jacques Dubucs pour la confiance qu'il m'a accordée pendant ces années, et en acceptant de diriger ma thèse alors que mon projet de recherches n'était que balbutiant. Je le remercie pour l'exigence philosophique et la stimulation qu'il a su me transmettre.

Je remercie l'IHPST de m'avoir accueilli au sein de son équipe. L'environnement intellectuel et amical qu'il m'a fourni a beaucoup compté dans la réalisation de cette thèse. Notamment, ce fut un plaisir de partager ces années de travail avec les nombreux doctorants que j'y ai rencontrés. Merci à tous ceux qui ont relu différents chapitres de cette thèse, ou auparavant les textes qui en étaient les ancêtres.

Je veux remercier l'Université de Paris 1 pour l'allocation de recherche qui m'a fourni les moyens matériels d'accomplir cette thèse. Le monitorat à l'ENS de Cachan m'a donné l'occasion d'approfondir ma connaissance de l'histoire de la physique et d'en tirer des motivations nouvelles pour cette thèse.

Philip Kitcher m'a accueilli à l'Université de Columbia pour un séjour de recherche : qu'il soit ici remercié pour sa disponibilité à discuter de mes travaux, et pour m'avoir encouragé à approfondir mes idées. Je veux remercier aussi David Albert et Michael Strevens, pour leurs relectures et leurs encouragements à poursuivre et développer mes idées. Merci à Chris Fuchs, Jean Bricmont, John Sipe et Aephraim Steinberg, pour avoir pris le temps de s'entretenir avec moi sur différentes questions

de mécanique quantique.

Je veux remercier les nombreux acteurs de ma formation philosophique pendant ces années de thèse. L'école d'été de Genève (GSSPP09) et le cours de David Albert à Columbia, tous deux sur la philosophie de la mécanique quantique, ont été des formations décisives à maints égards. Les conférences internationales auxquelles j'ai pu participé m'ont beaucoup aidé à avancer dans la structuration et l'exposition de mes travaux ; je souhaite en remercier les organisateurs et tous ceux qui m'y ont fait des critiques. Je dois enfin beaucoup aux groupes de lecture auxquels j'ai participé, notamment Philsci, l'atelier doctoral de l'IHPST. Je pense aussi à tous les enseignants qui, alors j'étais encore étudiant en physique, ont su me transmettre leur savoir et leur passion, et m'ont éveillé aux questionnements philosophiques.

Enfin, il est certain que cette thèse n'aurait pas pu être menée à bien sans de nombreux proches qui m'ont soutenu et encouragé, tout au long de ces années. Ils m'ont rendu le travail plus facile et m'ont permis de l'aborder avec davantage de sérénité. Je tiens à les remercier tous ici, de la plus anonyme façon, et leur témoignerai ma gratitude de vive voix.

Introduction

Il est communément admis qu'un des projets de la science et de ses théories est de proposer une image vraie pour le monde. Par « image », il faut entendre les types d'objets et de propriétés qui composent le monde. Par exemple, on attend d'une théorie de l'optique qu'elle nous dise si la lumière est de nature corpusculaire ou ondulatoire. Il s'agit de savoir, par exemple, si une théorie décrit un monde déterministe, ou au contraire si elle elle fait appel à un hasard fondamental. Ou encore, si les interactions qu'elle décrit sont locales, ou si des influences instantanées à distance sont possibles. Répondre à ces questions en fournissant une image possible pour le monde, c'est ce qu'on appelle généralement « interpréter » une théorie.

Il se trouve qu'il est possible d'interpréter différemment une même théorie, en proposant des images du monde différentes. La mécanique classique, par exemple, est compatible avec deux images du monde différentes : dans l'une, le monde suit un principe de moindre action, c'est-à-dire qu'il évolue en minimisant une certaine grandeur physique appelée l'action ; dans l'autre, ce sont des forces qui guident ce monde dans un processus déterministe. Certaines théories peuvent ainsi accepter plusieurs interprétations, tout en conservant le même contenu empirique. Autrement dit, les différentes interprétations d'une théorie donnent lieu à une équivalence empirique et elles ne peuvent pas être discriminées par l'expérience. Lorsqu'elles existent, ces interprétations multiples sont souvent associées à des formulations mathématiques différentes de la théorie et à des axiomatisations différentes.

Il existe plusieurs cas d'interprétations multiples d'une théorie en physique. La mécanique classique présente les formulations newtonienne, hamiltonienne et lagrangienne, qui toutes proposent des images du monde différentes. La relativité générale fait l'objet d'interprétations substantialistes ou relationnalistes de l'espace-temps. De même en mécanique quantique, coexistent aujourd'hui les interprétations de Bohm, d'Everett, des histoires décohérentes, en terme d'information et tant d'autres, en plus de l'interprétation orthodoxe enseignée dans les universités. Cette pluralité d'interprétations quantiques a suscité de nombreux débats philosophiques. On peut citer la

célèbre controverse entre Bohr et Einstein, qui a eu lieu dans les premières années de la mécanique quantique ; aujourd'hui, la littérature philosophique sur les interprétations quantiques est riche et vivante.

Je propose dans cette thèse d'étudier les enjeux liés à la pluralité des interprétations que certaines théories scientifiques peuvent recevoir. Je me concentre sur un cas d'étude, celui de la mécanique quantique, car cette théorie présente des caractéristiques qui la rende particulièrement intéressante. Tout d'abord, les interprétations quantiques s'opposent fondamentalement : certaines interprétations décrivent un monde indéterministe et non-local, quand d'autres le considèrent comme déterministe et local. Elles sont incompatibles en un sens qui ne concerne pas, par exemple, les interprétations de la mécanique classique. Ces dernières sont très souvent présentées ensemble et rendues interchangeables. Personne ne propose d'en abandonner une au profit exclusif d'une autre. En mécanique quantique, c'est au contraire monnaie courante de voir des arguments développés en faveur de telle interprétation ou contre telle autre. La plupart des protagonistes souhaiterait la victoire sans partage de leur interprétation. Une autre particularité de la mécanique quantique est qu'il existe un problème conceptuel largement reconnu (le « problème de la mesure »), qui n'a d'équivalent dans aucune autre théorie scientifique. On peut considérer que les interprétations quantiques sont autant de tentatives pour résoudre ce problème. Aussi, l'existence de la pluralité d'interprétations est plus problématique en mécanique quantique qu'en mécanique classique. Un dernier point concerne la terminologie employée : ce que j'appelle *interprétation* définit pour certains des *théories* différentes. Selon eux, ces interprétations s'appuient sur des formulations axiomatiques distincts de la théorie et des formalismes différents, ce qui justifie de parler de théories différentes. J'examinerai cette question dans ma thèse, lorsque j'aborderai la définition des théories scientifiques.

Puisque la mécanique quantique mérite d'être étudiée, précisons le constat qui peut être fait à son sujet. Il existe depuis plusieurs décennies (les années 1950) tout un ensemble d'interprétations très différentes. L'une d'elles, l'interprétation dite orthodoxe (ou de Copenhague), a été historiquement dominante et elle est toujours l'interprétation enseignée dans les universités. Parmi les chercheurs spécialistes de mécanique quantique, les diverses interprétations sont de popularité variable et aucun consensus clair ne se dessine. Les philosophes de la physique sont tout aussi divisés sur la question. Chaque interprétation a ses défenseurs célèbres, scientifiques et philosophes. Depuis une vingtaine d'années, l'intérêt pour les interprétations quantiques et le débat sur la question se sont renforcés. On peut donc dire que coexistent

une pluralité d'interprétations de la mécanique quantique. Cette pluralité n'est pas seulement de l'ordre des archives historiques, ou de la possibilité de principe : les communautés physiciennes et scientifiques actuelles sont divisées sur la question et la pluralité d'interprétations quantiques est pour elles une réalité. Je montrerai que cette diversité d'interprétations ne reste pas cantonnée aux discussions de salon : elle a aussi investi le domaine de la recherche et les nombreuses interprétations ont joué et jouent encore des rôles importants en pratique. La pluralité d'interprétations est donc une réalité de la recherche scientifique et la coexistence des interprétations a aussi lieu en pratique.

C'est cette situation de la mécanique quantique que je prends pour objet d'étude, en tant qu'elle est un exemple d'une théorie scientifique qui admet plusieurs interprétations. Je propose d'étudier cette situation selon plusieurs points de vue ou méthodologies ; cela constitue autant de parties dans ma thèse. La première partie repose sur une approche de reconstruction formelle de la théorie de la mécanique quantique et de ses nombreuses interprétations. Il s'agit de répondre à des questions comme : qu'est-ce qu'une interprétation ? en quel sens les différentes interprétations sont-elles équivalentes et définissent-elles une même théorie ? Cela suppose de prendre partie sur la définition d'une théorie scientifique elle-même. Je reconstruis aussi en détail plusieurs interprétations quantiques. Cette première partie permet en quelque sorte de poser les bases de l'analyse de la théorie de la mécanique quantique, en tant qu'elle est un objet (éventuellement formel) de connaissance scientifique.

Dans une deuxième partie, je m'intéresse aux rôles que jouent les différentes interprétations dans la recherche scientifique. J'adopte une perspective d'étude qui fait droit aux différents aspects de la pratique scientifique. Je pose cependant les limites suivantes : je n'étudie que les usages épistémiques et conscients de ces interprétations, qui sont pour la plupart publics. En d'autres termes, le rôle des interprétations dans la pratique scientifique consiste essentiellement à ce qui transparaît dans les articles scientifiques publiés, ainsi qu'aux travaux préparatoires non publiés. Je n'étudie pas ici les aspects sociaux, politiques ou économiques du problème. Dans cette partie, j'étudie aussi l'unité qui existe dans la recherche en mécanique quantique, en dépit de la diversité des interprétations utilisées.

Dans une troisième partie, je me penche sur les aspects normatifs de la pluralité d'interprétations. Je cherche à répondre aux questions : cette pluralité d'interprétations est-elle bonne ? Si oui, en quel sens et sous quelles conditions ? Je conserve ici une approche qui s'intéresse à la pratique scientifique : la question normative est posée par rapport au fonctionnement de la recherche scientifique. Ce faisant, j'aborde la

pluralité d'interprétations selon un point de vue d'épistémologie sociale, c'est-à-dire en prenant en compte le fait que la recherche scientifique est une entreprise collective. Il s'agit de savoir si la façon dont les interprétations jouent un rôle dans la recherche ne pourrait pas être susceptible de diviser la communauté scientifique et de freiner son progrès épistémique. Kuhn a proposé une thèse à ce sujet. L'historien et philosophe des sciences affirme que

> « On peut toujours pratiquer une science [...] sans un consensus ferme ; mais cette pratique plus souple n'engendrera pas [...] de progrès scientifique substantiel et rapide. »[1]

Selon Kuhn, c'est l'absence d'une pratique consensuelle qui explique le ralentissement du progrès. Comme les scientifiques se divisent selon plusieurs approches, ils gaspillent leur puissance de travail et ne contribuent pas de façon optimale au progrès commun de leur discipline. À supposer que ce raisonnement soit valide, la question se pose de savoir ce qui constitue une pratique consensuelle : qu'est-ce qui a besoin d'être commun et consensuel pour que cela engendre un progrès rapide, comme le soutient Kuhn ? Adopter et utiliser des interprétations différentes d'une théorie est-ce déjà aller en-deçà du consensus requis ? et pourquoi cela suffirait-il à ralentir la marche de la discipline ? Le raisonnement même de Kuhn, qui insiste sur le consensus, n'est pas partagé par tous. Le physicien Maxwell fait de son côté un éloge de la différence des approches :

> « Dans une Université nous sommes particulièrement contraints de reconnaître non seulement l'unité de la science elle-même, mais aussi la communion des travailleurs de la science. [...] Nous ne pouvons mieux faire, par conséquent, que de tirer parti de l'occasion en aidant la fertilisation croisée des sciences. »[2]

Maxwell estime que les échanges entre les théories et entre les sciences peuvent s'avérer féconds, en donnant naissance à de nouveaux résultats. La diversité des approches est ici un avantage pour le progrès des disciplines, sans que l'unité de la science ne soit remise en cause pour autant. À supposer que ce raisonnement soit valide, quelles sont les conditions de cette fertilisation ? Et n'y a-t-il pas une limite au caractère bénéfique qu'apportent des approches différentes ? Maxwell aboutit à la conclusion inverse de celle de Kuhn. Peut-être la vérité se situe-t-elle entre les deux. Pour répondre à ces

[1] Kuhn (1977), p. 312-313. Une remarque générale concernant les citations dans cette thèse : sauf si la référence dans la bibliographie (p. 267 et suivantes) indique que j'ai consulté un ouvrage dans une traduction française, la traduction des citations d'ouvrages en anglais est de moi.

[2] Maxwell (1878).

questions et pour apprécier quantitativement les différents facteurs en présence, je prends dans cette troisième partie le cadre de la théorie des jeux. Je propose un modèle formel pour rendre compte de la démarche de recherche et de publication.

Les présupposés que j'adopte dans mon travail sont les suivants. Tout d'abord, je considère que la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations peuvent être prises comme un objet d'étude de philosophie générale des sciences. J'estime ainsi que l'étude des interprétations quantiques ne se limite pas aux questions de philosophie de la physique (par exemple : laquelle résout mieux le problème de la mesure ? quelle est la nature du hasard quantique ? etc.). Je n'argumenterai nulle part, dans le présent travail, en faveur de l'une ou l'autre des interprétations quantiques, ni ne chercherai à les raffiner. Je me servirai seulement de la situation de pluralité d'interprétations de la mécanique quantique, que je prends comme donnée, pour poser des questions de philosophie générale des sciences — des questions à propos de l'équivalence empirique, de l'unité de la science, du progrès scientifique et de la division en plusieurs communautés. Enfin, je souhaite préciser que la démarche que j'adopte n'est pas une pétition de principe contre le débat portant sur l'interprétation de la mécanique quantique, que je trouve passionnant à plus d'un titre ; je souhaite simplement proposer un nouveau regard sur la théorie.

Dans ce travail, je fais le choix de me limiter aux seules interprétations de la mécanique quantique qui sont empiriquement équivalentes. Je ne considérerai pas les théories qui conduisent à des prédictions différentes. Autrement dit, je considère l'interprétation orthodoxe (ou de Copenhague), la mécanique de Bohm, l'interprétation des mondes multiples d'Everett, l'interprétation en terme d'histoires décohérentes, etc., mais pas la théorie dite GRW qui suppose une réduction spontanée de la fonction d'onde, ou celles de Gisin, Pearle ou Penrose. Je n'étudie donc pas toutes les propositions qui ont été faites pour résoudre le « problème de la mesure » (je suppose que ce problème n'est pas la seule façon d'aborder la mécanique quantique) ; je fais le choix particulier des interprétations empiriquement équivalentes, parce qu'elles partagent des caractéristiques intéressantes, comme je le montrerai aux chapitres 2 et 5.

Une autre hypothèse de mon travail est d'ordre méthodologique : pour étudier la pluralité des interprétations d'une théorie, je revendique le choix d'adopter plusieurs types d'approches, que je fais se compléter. C'est ainsi que la première partie relève d'une approche de reconstruction « en principe » et parfois formelle ; la deuxième appartient à une approche philosophique qui fait droit à la pratique scientifique ; la troisième relève de l'épistémologie sociale et s'inscrit dans le cadre de la théorie des

jeux.

Un dernier point concerne le rapport de mon travail à l'histoire de la mécanique quantique. Je ne prétends pas ici apporter de nouvelle lecture historique de la discipline. En revanche, je me servirai de travaux scientifiques dont certains n'ont pas fait l'objet d'une étude historique particulière. Je m'intéresserai alors surtout au rôle épistémique des interprétations, sans chercher à proposer une reconstruction historique plus complète.

Première partie

Les interprétations de la mécanique quantique

Introduction

L'objectif de cette première partie est de présenter ce que sont les diverses interprétations de la mécanique quantique. Cela peut se comprendre en deux sens et je les aborderai tous deux ici. D'une part, il s'agit d'exposer le contenu de ces interprétations, qui font l'objet de discussions ardentes parmi les physiciens et les philosophes de la physique. La question à laquelle on veut répondre est « que dit chacune des interprétations quantiques du monde ? ». D'autre part, il s'agit de caractériser ces interprétations, en analysant de façon générale ce en quoi consiste interpréter une théorie scientifique, comme par exemple la mécanique quantique. La question est dans ce cas « Que signifie interpréter une théorie ? ». La réponse à cette seconde question n'est pas consensuelle. Cela suppose en effet de répondre à la question préalable « qu'est-ce qu'une théorie ? ». La philosophie des sciences est riche de positions diverses à propos de cette question. Selon les réponses apportées, la définition de ce qu'est une interprétation (et sa relation à la théorie tout entière) est fort variable.

Pour aborder ces questions, le premier chapitre introduit ce que signifie interpréter une théorie. L'objectif est de brosser les grands traits de ce qu'est l'interprétation d'une théorie scientifique. Je donne un aperçu des différentes positions, dans le but de dégager des caractéristiques générales et consensuelles. Je propose la caractérisation selon laquelle l'interprétation d'une théorie a pour fonction de fournir l'image d'un monde dans lequel la théorie serait vraie. Ce premier chapitre ne porte pas particulièrement sur la mécanique quantique, mais concerne l'interprétation d'une théorie scientifique en général. Il a une vocation pédagogique et il prépare aux chapitres suivants.

Dans un deuxième chapitre, je présente plusieurs des interprétations de la mécanique quantique, parmi celles qui sont les plus importantes aujourd'hui : l'interprétation dite orthodoxe, la mécanique bohmienne et l'interprétation des mondes multiples. J'indique l'image du monde qu'elles proposent et je précise comment la théorie quantique ainsi interprétée est reliée à l'expérience.

Enfin, je reviens dans un troisième chapitre sur la définition de l'interprétation d'une théorie. Je me limite alors au cas de la mécanique quantique. L'objectif du chapitre est de déterminer quelle conception philosophique des théories est en mesure de rendre compte de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations. Je confronte dans le détail les conceptions dite syntaxique et sémantique aux interprétations quantiques du chapitre 2. Il ressort que ces conceptions doivent faire face à certaines particularités de la mécanique quantique, qui pourraient les empêcher de

s'appliquer à cette théorie.

Dans toute cette partie, j'étudie les interprétations de la mécanique quantique et leur pluralité en adoptant une approche qu'on peut qualifier de « en principe » à la suite de Humphreys (2004). C'est-à-dire que je reconstruis (éventuellement à l'aide d'outils formels) le contenu empirique de la mécanique quantique, selon la façon dont elle est interprétée. Je m'intéresse aux différentes formulations de la théorie et à sa structure logique. Je ne considère pas ici, par exemple, la façon dont la théorie ou ses interprétations ont été produites historiquement ou sont utilisées par les physiciens. Cette seconde approche, qualifiée de « en pratique », sera adoptée dans la deuxième partie de cette thèse.

Chapitre 1

Interpréter une théorie scientifique

Introduction

Les théories physiques contemporaines, au premier rang desquelles figure la mécanique quantique, se présentent sous forme mathématisée, avec des formalismes élaborés. Ces théories formelles doivent être interprétées pour pouvoir rendre compte des expériences et de leurs résultats. Le but de ce chapitre est d'introduire la notion d'interprétation d'une théorie, dans sa généralité. Ce chapitre prépare aux chapitres suivants : avant de présenter les différentes interprétations quantiques, il importe de savoir quel rôle l'interprétation d'une théorie est censée jouer et ce que l'on peut attendre d'elle. Je considère dans ce chapitre l'interprétation des théories scientifiques dans leur généralité. Je n'y parle donc pas exclusivement de mécanique quantique et je prends des exemples en mathématiques et en mécanique classique.

Des positions diverses et parfois antagonistes ont été défendues à propos de ce qu'est l'interprétation d'une théorie — et, préalablement, à propos de ce qu'est une théorie scientifique. Dans ce chapitre introductif, je fais droit à ces diverses positions en m'attachant à ce qui est consensuel aujourd'hui. Un des objectifs est de proposer une définition de travail de l'interprétation d'une théorie, définition qui pourrait être acceptée par tous. Je ne rentre pas dans le détail des controverses et je relègue les discussions techniques et non-consensuelles au chapitre 3. C'est là que je discute de la définition de l'interprétation dans le cas précis de la mécanique quantique, au regard des interprétations quantiques présentées au chapitre 2. Il apparaîtra en effet que la mécanique quantique présente certaines particularités, qui requièrent une discussion plus raffinée que les caractéristiques générales présentées dans ce chapitre 1.

Dans ce chapitre, je commence par présenter la notion d'interprétation sémantique

d'une théorie en logique et en mathématiques (section 1). J'aborde ensuite les questions nouvelles posées par les théories scientifiques et notamment celles de la physique (section 2).

1 L'interprétation en logique et en mathématiques

La notion d'interprétation d'une théorie trouve une expression rigoureuse en mathématiques ou en logique. Interpréter prend un sens sémantique : il s'agit d'associer des référents à des symboles. Dans cette section, je présente ce concept d'interprétation. Il s'avérera essentiel pour comprendre plus loin (section 2 et chap. 3) l'interprétation des théories physiques.

Commençons par un exemple, avec la phrase « Mathurin est plus grand que Philibert ». Cette phrase peut décrire une situation vraie dans le monde. Elle peut être réécrite de façon plus formelle comme « $x\mathcal{R}y$ ». Pour qu'elle conserve son sens, il faut intuitivement que x désigne ici la personne prénommée « Mathurin », y celle prénommée « Philibert » et que $\mathcal{R}$ soit la relation « être plus grand que ». Considérons à présent l'expression « $x\mathcal{R}y$ » pour elle-même, sans faire référence à la phrase initiale écrite en langage naturel. Tant que l'on n'indique pas comment chacun des symboles x, y, $\mathcal{R}$ doit être compris, ou à quoi il renvoie, cette expression ne signifie rien. On n'est pas en mesure de dire si elle est vraie ou fausse. Elle peut d'ailleurs être interprétée différemment. Si on indique par exemple que x désigne Alice, y désigne Bob et $\mathcal{R}$ désigne « être la sœur de », l'expression prend un sens tout à fait différent — et elle peut être vraie ou fausse, indépendamment du premier cas. Il s'agit là de deux interprétations différentes d'une même expression.

Je vais maintenant présenter la logique du premier ordre, qui permet d'analyser les phrases du langage naturel à l'aide d'expressions formelles de ce genre. De façon générale, on définit tout d'abord un langage formel L comme un ensemble de signes. On distingue les signes logiques (quantificateurs, variables, ...) des signes non-logiques (constantes, symboles de fonctions et de relations). Un tel langage n'est pas encore interprété : il ne s'agit que de symboles ; ce que sont ces fonctions ou ces relations n'est pas précisé. Comme on ne dit pas à quoi elles s'appliquent, les formules de ce langage ne sont ni vraies, ni fausses. Pour que les formules du langage puissent recevoir une valeur de vérité, il est nécessaire que ce langage reçoive une interprétation. Pour cela, on définit tout d'abord un ensemble D, le *domaine d'individus* ou *d'objets* (ses éléments sont appelés les *individus* ou *objets*). On définit aussi une fonction d'interprétation I, qui associe à chaque constante du langage L un élément de D (un

individu) et à chaque symbole de fonction ou de relation respectivement une fonction ou une relation sur D. Ainsi, les éléments de D deviennent des référents du langage L. On appelle la paire $\{D, I\}$ une structure d'interprétation, ou une interprétation. Dès lors qu'elle est interprétée, une expression formelle E est susceptible d'être vraie ou fausse. Si une paire $\{D, I\}$ rend une telle expression vraie, on dit qu'elle est un modèle[1] de E.

Considérons un exemple issu des mathématiques et emprunté à van Fraassen[2]. Soit la théorie T définie par les axiomes suivants :

1. Pour toute paire de droites, il existe au plus un point qui appartient aux deux.
2. Pour toute paire de points, il existe exactement une droite qui les relie.
3. Sur toute droite, il existe au moins deux points.

Interpréter cette théorie (ou fournir un modèle de cette théorie) consiste à exhiber une structure dans laquelle ces axiomes sont vrais. Autrement dit, il s'agit de dire à quoi « droite » et « point » correspondent — elles sont les variables de cette théorie. Un premier exemple d'interprétation de T réside dans les droites et points de la géométrie euclidienne, dans le plan à deux dimensions. On vérifie facilement que chacun des trois axiomes y est vérifié. Une autre interprétation possible de cette théorie réside dans une structure géométrique appelée le plan de Fano (figure 1.1). Les « points » sont les disques pleins noirs, tandis que les « droites » sont les lignes continues (les trois côtés du triangle, les trois hauteurs et le cercle inscrit). On vérifie ici aussi que les axiomes de T sont vérifiés pour cette structure : il s'agit d'un modèle de T.

Cet exemple illustre une caractéristique générale : plusieurs modèles peuvent satisfaire une théorie donnée. Il en existe même généralement une infinité. On peut définir la classe des modèles qui satisfont la théorie, notée $\mathrm{Mod}(T)$.

Supposons que l'on définisse une théorie T' à l'aide des trois axiomes précédents, plus l'axiome suivant :

4. Il existe seulement un nombre fini de points.

[1] Le terme de « modèle » est polysémique. En plus du sens logique, un modèle peut désigner entre autres des équations utilisées pour représenter un phénomène de manière idéalisée (c'est le cas par exemple du modèle de l'oscillateur harmonique), ou un objet concret qui présente certaines propriétés ou relations avec un autre objet qu'il représente (par exemple, comme l'est un modèle réduit d'une voiture). Je reviendrai plus loin sur ces autres sens du terme « modèle », notamment au chapitre 3.

[2] Cf. van Fraassen (1980), p. 41-44. Je m'en inspire librement.

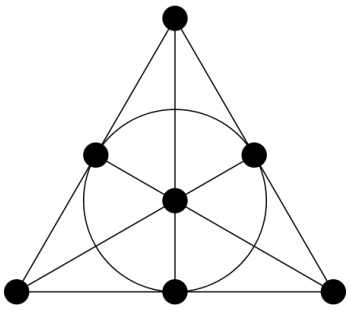

FIGURE 1.1 – Le plan de Fano est une structure géométrique pour laquelle les axiomes de la théorie T sont vrais.

La géométrie euclidienne n'est plus un modèle de la nouvelle théorie T', parce qu'elle contient une infinité de points. En revanche, la structure de la figure 1.1 est un modèle de T', car elle contient seulement 7 points. L'ensemble des modèles qui satisfont T' est plus petit que l'ensemble des modèles qui satisfont T.

Ainsi, l'interprétation d'une théorie consiste en mathématiques à fournir un domaine d'individus, de façon à ce que les variables de la théorie reçoivent un référent. C'est à cette condition que les expressions de la théorie peuvent recevoir une valeur de vérité. On distingue ensuite les interprétations ou modèles qui satisfont une théorie, de ceux qui ne la satisfont pas.

2 L'interprétation d'une théorie physique

La notion d'interprétation mathématique présentée dans la section précédente est la base sur laquelle on doit comprendre l'interprétation d'une théorie physique. Néanmoins, on va voir qu'elle ne suffit pas à définir l'interprétation et le contenu empirique des théories physiques et qu'elle ne résout pas tous les problèmes qui peuvent se poser. Grossièrement, la raison en est qu'une théorie physique ne se compose pas seulement de variables capables de recevoir directement un référent empirique. Elle utilise plutôt des variables ou des concepts enchevêtrés, dont certains n'ont qu'un lien très indirect avec l'expérience. Autant « Mathurin » peut référer à une personne humaine identifiable, autant « potentiel électrique » ou « force » n'ont pas de référent direct évident et leur interprétation passe par de nombreux détours théoriques.

Cette section a pour but d'introduire la notion d'interprétation d'une théorie physique. Diverses définitions ont été proposées ces dernières décennies, à travers ce qui

a été appelé les conceptions syntaxiques et sémantiques des théories scientifiques. Je n'entends pas trancher les débats dans ce chapitre introductif (une discussion détaillée vis-à-vis des interprétations quantiques aura lieu au chapitre 3). Je vais faire droit à chacune des positions, afin d'apporter des éclairages différents sur les rôles et les caractéristiques d'une interprétation. Un objectif de cette section est de proposer une caractérisation de l'interprétation d'une théorie sur laquelle les diverses conceptions pourraient se rejoindre, de façon au moins approximative.

Une première section présente les nouveautés de la notion d'interprétation quand elle concerne une théorie physique. Dans un deuxième temps, les différents rôles d'une interprétation physique sont tracés à gros traits (section 2.2). Un aperçu historique des définitions de l'interprétation est ensuite esquissé (section 2.3). Une définition de travail de l'interprétation est proposée (section 2.4), avant que quelques questions plus générales ne soient abordées (section 2.5).

2.1 Difficultés de l'interprétation d'une théorie physique

Dans cette section, je m'appuie sur un exemple pour expliquer pourquoi l'utilisation de l'interprétation au sens mathématique de la section 1 pose des difficultés pour une théorie physique.

Pour présenter une théorie physique, on peut faire appel à un énoncé sous forme d'axiomes, exprimés dans un langage de symboles mathématiques et de concepts. Considérons par exemple la mécanique newtonienne, dans une expression contemporaine simplifiée. Ses axiomes, ou principes, peuvent s'énoncer ainsi :

1. Principe d'inertie. Dans un référentiel galiléen, le mouvement d'un point matériel isolé (c'est-à-dire sur lequel aucune force ne s'applique) est rectiligne et uniforme :
$$\vec{F} = \vec{0} \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{v} = \overrightarrow{cte} \tag{1.1}$$

2. Principe fondamental de la dynamique. Dans un référentiel galiléen, la somme des forces qui s'exercent sur un point matériel est égale à la dérivée temporelle de sa quantité de mouvement, c'est-à-dire au produit de sa masse par son accélération :
$$\vec{F} = \frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t} = m\vec{a} \tag{1.2}$$

3. Principe des actions réciproques. Pour deux points matériels 1 et 2, la force

exercée par 1 sur 2 est l'opposée de celle exercée par 2 sur 1 :

$$\vec{F}_{1\to 2} = -\vec{F}_{2\to 1} \tag{1.3}$$

Cette théorie utilise des variables telles que $\vec{F}$, $\vec{v}$, $\vec{p}$, m, $\vec{a}$, t et des termes tels que « point matériel », « référentiel », « galiléen », « rectiligne », « uniforme », sans compter les termes associés aux précédentes variables (force, masse, ...). Considérée d'un point de vue purement syntaxique, cette théorie n'est ni vrai ni fausse : si les variables et les termes ne sont pas interprétés, la théorie n'a aucun contenu empirique.

Dans le sens logique de la section 1, proposer une interprétation de cette théorie, c'est donner l'ensemble D des individus et la fonction d'interprétation I. C'est dire par exemple à quoi correspondent $\vec{f}$ et m. Remarquons que le fait d'affirmer qu'ils correspondent à une « force » ou à une « masse » ne répond pas particulièrement au problème, si l'on ne précise pas ce que signifie « force » ou « masse ». Ce problème vient du fait que la physique considère de nouvelles entités par rapport au sens commun et à la vie courante. Les théories de la physique supposent de modifier l'image du monde et de proposer de nouveaux objets et propriétés. Ces nouvelles entités, qui permettent l'interprétation de la théorie, ne sont pas identifiables de manière simple et directe, en tout cas pas dans l'image commune du monde — on ne peut pas pointer du doigt un champ électrique, même si la théorie électromagnétique le considère comme une entité. Dans l'exemple de la vie courante « Mathurin est plus grand que Philibert », les référents sont non-problématiques parce qu'ils appartiennent à notre image courante du monde, constituée de personnes. Dans l'exemple des mathématiques, les référents « ligne » et « point » peuvent au moins être représentés dans l'espace Euclidien à deux dimensions, sur une feuille de papier. Rien de tel n'est possible ici avec les variables ou les termes de la théorie de la mécanique classique : $\vec{f}$ et $\vec{p}$ n'ont pas de référent dans l'image commune du monde que nous avons. Ou, du moins, ils sont plus délicats à décrire, à représenter ou à identifier. Ce problème de l'interprétation en physique tient notamment au holisme des théories : les entités que les théories physiques utilisent ne peuvent pas être considérées isolément de l'ensemble de la théorie. Par exemple, un champ électrique n'a pas de sens si on ne définit pas aussi des charges électriques.

2.2 À quoi sert une interprétation ?

Avant de présenter les différentes définitions de l'interprétation d'une théorie, telles qu'on les trouve dans la littérature philosophique, je souhaite dire un mot des rôles épistémiques qui lui sont généralement attribués, et répondre à la question : à quoi sert l'interprétation d'une théorie physique ? Il me semble que l'on peut distinguer au moins trois rôles qui sont généralement attribués à l'interprétation : (1) l'application empirique de la théorie, (2) la description d'un monde dans lequel la théorie est vraie et (3) une meilleure compréhension. L'objectif de cette section est de présenter à grands traits ces différents rôles. C'est seulement dans la section suivante, ainsi qu'au chapitre 3, que je rentrerai dans plus de détails, en faisant le lien entre ces buts et la définition plus précise de ce qu'est une interprétation.

Un des rôles de l'interprétation est de donner un contenu empirique à la théorie. Nous avons vu en effet qu'une théorie non-interprétée n'est qu'un ensemble de symboles, qui n'a pas de valeur de vérité. La théorie sans interprétation ne donne aucune prédiction expérimentale, elle ne dit rien des systèmes ou des expériences auxquels on voudrait l'appliquer et on ne peut pas se prononcer sur son adéquation empirique. L'interprétation remède à cela, en indiquant le lien entre les éléments du formalisme et les données expérimentales. C'est pourquoi l'interprétation d'une théorie est parfois qualifiée d'« empirique ». Elle est aussi appelée « interprétation instrumentaliste » dans la mesure où elle permet d'utiliser la théorie comme un instrument de prédiction, et ce sans qu'on ait nécessairement à prendre position sur les entités qui existent dans le monde.

Pour reprendre l'exemple de la mécanique newtonienne de la section 2.1, interpréter m consiste à dire qu'il s'agit de la masse du système, mesurable dans certaines conditions par une balance, elle-même étalonnée par rapport à une masse de référence conservée au Bureau International des Poids et Mesures. Grâce à une telle interprétation, une signification est attribuée au symbole m. Sa valeur numérique peut être utilisée pour réaliser des prédictions théoriques. De façon similaire, on peut interpréter $\vec{r}$ (dont la dérivée temporelle seconde donne $\vec{a}$) comme étant la distance par rapport à une origine fixe dans le référentiel.

Prenons un autre exemple, en mécanique quantique. L'objet mathématique central de cette théorie est la fonction d'onde, notée ψ. Dans une formulation simplifiée, il s'agit d'une fonction de la position et on la note $\psi(x)$; elle est à valeur dans les nombres complexes $\mathbb{C}$. Pour un système quantique tel qu'un électron, une interprétation de la fonction d'onde est la règle dite de Born, en référence au physicien Max

Born. Le module carré $|\psi(x)|^2$ y est interprété comme une densité de probabilité de mesure, c'est-à-dire que $|\psi(x)|^2 \mathrm{d}x$ est la probabilité que la mesure d'une position de l'électron soit comprise entre x et $x + \mathrm{d}x$. La mécanique quantique ne fait en effet que des prédictions probabilistes : dans ce cas, elle dit qu'une mesure en x aurait seulement une certaine probabilité de donner un résultat et que cette probabilité dépend de la position en question. Pour ce qui est de la mécanique quantique, on trouve souvent l'idée selon laquelle une telle interprétation, qui indique comment la mécanique quantique fait des prédictions et est empiriquement adéquate, ne pose pas de problème. J'en discuterai à la section 1 du chapitre 3 et je montrerai que cette position doit être nuancée.

Le deuxième rôle que j'identifie pour l'interprétation est de dire de quoi est (ou pourrait être) composé le monde selon la théorie. Cela peut être rapproché du rôle tenu par le domaine d'individus D, au sens de l'interprétation sémantique présentée à la section 1 : on indique les référents qui composent le monde dans lequel la théorie est vraie. On décrit ainsi comment peut être le monde si la théorie scientifique est vraie. Interpréter une théorie, c'est dire « à quoi *ressemble* le monde »[3] selon cette théorie. Une interprétation de la mécanique newtonienne dit par exemple que le monde se compose de points matériels massiques et de forces. On attend d'elle qu'elle dise si le monde comprend un espace absolu et un temps absolu. Dans le domaine de l'optique, Huygens, et ensuite Fresnel et Young, ont développé une théorie de la lumière dont l'interprétation repose sur la propagation d'ondes. De son côté, Newton a proposé une théorie dont l'interprétation mettait en jeu essentiellement des grains de lumière (des corpuscules). Remarquons que la donnée de ce qui compose le monde n'est pas forcément à prendre en un sens réaliste. Cela signifie qu'il n'y a pas besoin d'être réaliste pour s'intéresser aux questions d'interprétation d'une théorie et à l'image du monde qu'elle propose. Certains défendent des interprétations anti-réalistes de la mécanique quantique ; van Fraassen (1991), qui revendique un empirisme constructif, a proposé une interprétation dite « modale » de la mécanique quantique. L'attitude à adopter face aux entités que l'interprétation décrit est libre. Comme de nombreuses interprétations différentes peuvent rendre la théorie vraie, une interprétation particulière dit seulement comment pourrait être le monde. Donner une image du monde revient essentiellement à préciser les entités qui composent le monde et sur lesquelles porte la théorie. C'est ainsi que Goldstein affirme qu'une interprétation a pour fonction de

> « discerner dans la description quantique les objets que nous croyons que la

[3] Ismael (2009), introduction.

mécanique quantique devrait décrire. »[4]

La description quantique dont parle Goldstein n'est autre que le formalisme mathématique que la théorie utilise pour rendre compte des expériences. Pour Goldstein, interpréter la théorie revient à proposer des entités auxquelles ce formalisme peut référer. En l'occurrence, il veut défendre que ces entités consistent en des atomes et des électrons (il s'oppose à ceux qui conçoivent la mécanique quantique comme étant la description des régularités macroscopiques, ces régularités étant elles même conçues comme des résultats de mesure). L'interprétation propose une hiérarchie entre les entités qui doivent être tenues pour fondamentales et celles qui sont dérivées. Par exemple, une interprétation de la mécanique newtonienne peut tenir les forces pour les entités premières et les potentiels[5] pour des entités dérivées. L'interprétation indique aussi quelles propriétés sont susceptibles d'être attachées aux entités. Par exemple, les particules matérielles newtoniennes ont une masse, une charge, une position, mais pas de dimension spatiale (je me restreins ici à la mécanique du point). Interpréter une théorie revient, pour reprendre une formule de Sellars (1962), à donner une « image du monde » composée d'entités dont on postule l'existence (par exemple, des forces, des ondes, etc.) et dont on spécifie les propriétés[6].

Le troisième rôle que j'identifie pour l'interprétation d'une théorie est d'apporter une certaine compréhension. Cette compréhension peut concerner, selon le cas, ou bien le monde (par exemple, « le monde des atomes »[7] pour la mécanique quantique), ou bien la théorie elle-même et son formalisme aride. Dans tous les cas, cela sous-entend que le premier aspect de l'interprétation — donner un contenu empirique à la théorie formelle — n'est pas suffisant quant à la compréhension qu'il apporte. Savoir prédire adéquatement un phénomène empirique, n'apporte pas en tant que tel de la compréhension. C'est par exemple une position de Hughes. Dans son ouvrage consacré à la mécanique quantique (1989), il présente la partie consacrée à l'interprétation de la mécanique quantique comme une recherche d'« une compréhension plus profonde de ce que l'algorithme nous dit »[8]. L'algorithme auquel il réfère repose sur le formalisme mathématique et les règles permettant de calculer des prédictions probabilistes — c'est un algorithme prédictif. Ainsi, Hughes considère que l'interprétation va apporter une compréhension plus grande que ne peut le faire le formalisme seul. En disant de

[4]Goldstein (2009), section 1.

[5]Une force $\vec{f}$ est dite conservative si elle dérive d'un potentiel U selon la relation suivante : $\vec{f} = -\overrightarrow{\mathrm{grad}}(U) = -\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}\vec{x} - \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}y}\vec{y} - \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}z}\vec{z}$.

[6]Je discuterai plus en détail de la position de Sellars dans la section 2.4, p. 31.

[7]Faye (2008), introduction.

[8]Hughes (1989), p. 155.

quoi pourrait être composé le monde, l'interprétation propose de dire « ce que si passe vraiment » sous les phénomènes et c'est en cela qu'elle pourrait apporter une compréhension.

À partir de ces trois rôles différents d'une interprétation, on peut commencer à avoir une idée des raisons pour lesquelles plusieurs interprétations d'une théorie peuvent exister. Si le contenu empirique associé au formalisme est à peu près fixé (sens 1 d'interprétation), l'image possible du monde dans lequel la théorie est vraie n'est pas uniquement déterminée. C'est-à-dire que plusieurs classes d'entités peuvent rendre compte de la façon dont la théorie parvient à être vraie. J'ai indiqué par exemple que la force peut être reliée à un potentiel, à travers l'équation $\vec{f} = -\overrightarrow{\text{grad}}(U)$: cette relation permet de choisir soit la force $\vec{f}$ soit le potentiel U comme l'entité qui compose le monde, tout en permettant une correspondance aisée entre les deux entités. Suivant cette idée, on peut proposer plusieurs images du monde : une première contient des forces (l'interprétation newtonienne dont on a parlé plus haut) et une seconde contient des potentiels et des énergies (il s'agit de l'interprétation dite hamiltonienne).

2.3 Définition d'une interprétation : un aperçu historique

À présent qu'on a une idée de l'utilité de l'interprétation d'une théorie, je propose un autre angle de lecture. Je présente un aperçu historique des différentes conceptions de l'interprétation d'une théorie. Je m'appuie pour cela sur les différentes positions de ce qu'est une théorie scientifique. J'en retiens ici deux : la conception dite « syntaxique » des théories et la conception dite « sémantique ». Il s'agit ici seulement d'une introduction : le but est de donner de nouveaux points de vue sur la manière de concevoir une interprétation. Il s'agit ainsi de préparer la présentation, au chapitre suivant, de ce dont la littérature réfère comme des « interprétations » de la mécanique quantique. L'objectif n'est *pas* ici de discuter précisément des avantages ou inconvénients de chacune des conceptions (j'en suggère tout au plus quelques-uns au passage) ; une présentation plus détaillée aura lieu au chapitre 3, avec une discussion critique au regard des interprétations de la mécanique quantique.

Une première conception de l'interprétation d'une théorie repose sur ce qui a été appelé la « conception syntaxique » des théories scientifiques. Il s'agit d'une position défendue initialement par le courant de l'empirisme logique avec des auteurs tels que Carnap, Hempel ou Nagel. Ils ont en commun de vouloir réduire la signification des énoncés scientifiques à leurs contenus empiriques. Pour cela, ils cherchent à reconstruire formellement une théorie scientifique à l'aide du langage qu'elle uti-

lise. Schématiquement, leur analyse est la suivante. Elle suppose une distinction entre deux types de termes, dans le langage de la théorie : les termes observationnels et les termes théoriques. Les premiers sont directement interprétés comme référant à des objets physiques observables. Les seconds n'ont pas de lien direct à l'empirique : ils ont seuleemnt un lien indirect, à travers des « règles de correspondance ». Il s'agit de définitions des termes théoriques à partir de termes observationnels. C'est ainsi que la théorie peut s'exprimer au moyen de termes théoriques et néanmoins avoir une signification cognitive. Dans la conception syntaxique, une théorie est définie par le langage qu'elle utilise, les postulats théoriques qui permettent de l'énoncer et ses règles de correspondance (un langage différent ou des postulats formulés différemment définiraient une autre théorie). Interpréter une théorie signifie donc donner des règles de correspondance pour ses termes théoriques, de façon à ce qu'ils réfèrent *in fine* à des entités observables.

Cette conception syntaxique a fait l'objet de diverses versions et raffinements. Je vais en présenter deux ici, qui sont intéressantes pour les notions d'interprétation qu'elles proposent, assez opposées l'une de l'autre. La première version est celle de Bridgman (1927), dont la position revient à défendre une certaine conception de ce que sont les règles de correspondance, qui définissent les termes théoriques. Bridgman s'interroge sur la façon dont les concepts qu'utilise la physique, tels que « longueur », « pression » ou « température », acquièrent une signification empirique. Selon lui, la signification de ces termes est essentiellement expérimentale : elle provient de la façon dont on mesure ces grandeurs. Le sens de « longueur », par exemple, est donné par l'utilisation de règles graduées (dès lors qu'il s'agit de corps aux dimensions comparables à notre taille humaine), de la mesure d'un temps de voyage de la lumière (pour des distances astronomiques) ou encore par des techniques interférométriques (pour des distances microscopiques). La cohérence de ces différentes opérations de mesure est assurée grâce à des recoupements appropriés. Interpréter un terme d'une théorie, par conséquent, revient à en donner une définition opérationnelle au moyen d'opérations réalisables au laboratoire. L'interprétation d'une théorie est ainsi réduite aux manipulations qui sont effectuées et aux façons de procéder à des mesures. On note que cet opérationnalisme est aujourd'hui revendiqué dans certains courants interprétatifs de la mécanique quantique[9]. La position de Bridgman a été critiquée pour diverses raisons. L'une d'elles est qu'une définition opérationnelle d'un concept

[9]Par exemple, Peres revendique dans son manuel de mécanique quantique (1993) une approche opérationnaliste des concepts quantiques (cf. p. xii, 24-25, 57, 116, 153). Wallace (2008, section 3.4) fait de l'opérationnalisme un candidat à l'orthodoxie et cite notamment Peres.

n'épuise pas le sens que les scientifiques lui attribuent. Ce qui rend intéressant un concept théorique est précisément le fait qu'il ne se limite pas aux situations et applications connues : il doit avoir un sens plus étendu que celui attribué initialement par son usage ou conféré par les définitions opérationnalistes. Une autre critique porte sur le fait que tous les concepts théoriques ne peuvent pas faire l'objet d'une définition opérationnelle. Par exemple, Bridgman a reconnu lui-même que la fonction d'onde de la mécanique quantique (dont nous avons vu qu'elle est l'objet mathématique central de la théorie) ne peut faire l'objet d'une définition opérationnelle[10], et que les forces internes à un solide non plus.

Une autre version de la conception syntaxique a été défendue par Ernest Nagel (1961), dans laquelle le terme d'« interprétation » prend un sens nouveau. Nagel distingue trois composantes dans une théorie : 1) un système formel abstrait (c'est-à-dire un ensemble de postulats, qui sont des énoncés non-interprétés), 2) un ensemble de règles de correspondance qui donnent un contenu empirique au système formel et 3) une interprétation ou modèle pour le système formel. C'est la troisième composante qui nous intéresse ici : il s'agit d'un modèle au sens sémantique de la section 1, c'est-à-dire qu'il consiste à donner une liste d'entités, à propos de laquelle la théorie est vraie. Selon Nagel, ce modèle permet de rendre visualisable le système formel sous une forme familière. C'est à travers ces modèles que la théorie est généralement présentée : on indique par exemple que la théorie porte sur des particules ponctuelles, ou sur des ondes, que les propriétés des systèmes sont leurs énergies et leur position, etc. Pour Nagel, l'interprétation de la théorie est une liste d'entités caractérisées par certaines propriétés et relations. Vis-à-vis de Bridgman, il y a eu un déplacement du référent d'« interprétation » : le terme désigne non plus ce qui relie le formalisme à l'empirique, mais seulement un modèle particulier qui rend vraie la théorie.

Une seconde définition de l'interprétation d'une théorie s'appuie sur une conception dite « sémantique » des théories. Cette position a été défendue par des philosophes comme Suppes, Suppe, van Fraassen ou Giere. D'une certaine façon, on peut la comprendre comme exploitant seulement la troisième composante de Nagel, le « modèle ». Selon la conception sémantique, une théorie scientifique est définie par la classe des modèles qui la rendent vraie (au sens sémantique). Ici, il faut comprendre « modèle » au sens d'une structure $\{D, I\}$, comme présenté dans la section 1. La théorie n'est pas définie par une axiomatisation particulière ou un langage particulier, mais seulement par la donnée des situations dans lesquelles elle est vraie.

[10]Lundeen *et al* (2011) prétendent qu'une telle définition opérationnelle de la fonction d'onde est aujourd'hui possible à l'aide de la mesure dite « faible ».

Comment le lien avec l'empirique est-il établi ? L'idée est qu'il doit exister dans la théorie un modèle qui reflète le phénomène. Formellement, il doit exister une identité de structure (c'est-à-dire un isomorphisme) entre un phénomène et (une partie de) un modèle qui rend vraie la théorie. On peut préciser que le phénomène lui-même doit faire l'objet d'une modélisation, de sorte qu'il soit représenté par une structure. Une théorie est considérée comme empiriquement adéquate si tous les phénomènes sont isomorphes à des sous-structures qui rendent vraie la théorie. C'est, pour ainsi dire, ce qui vient remplacer les règles de correspondance qui ne font plus l'objet de définitions explicites. Selon la conception sémantique, fournir une interprétation d'une théorie n'est rien d'autre que donner l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie. Interpréter une théorie, c'est répondre aux questions « Sous quelles conditions cette théorie est-elle vraie ? À quoi dit-elle que le monde ressemble ? »[11]. Une interprétation fournit des individus, avec leurs propriétés, qui peuplent ce monde. Selon la conception sémantique, il n'existe pas de distinction valable entre ce qui est observable et ce qui ne l'est pas. Le lien avec des phénomènes et des résultats de mesures se fait à travers les isomorphismes entre les phénomènes et des parties des modèles. L'interprétation n'a plus pour objet de donner le contenu empirique de la théorie, ou de conférer seulement de la signification empirique à une syntaxe.

Dans cette section, j'ai présenté quelques définitions qui ont pu être données d'une interprétation. On peut retenir que le terme d'« interprétation » d'une théorie est à géométrie variable, en fonction de la conception que l'on a de ce qu'est une théorie scientifique elle-même. Le terme est utilisé dans des sens différents, par exemple même au sein de ce qui est appelé la conception syntaxique des théories. Il peut en résulter certaines confusions, puisque tous les auteurs ne référeront pas à la même chose sous un même terme. Néanmoins, je vais tenter de proposer dans la section suivante une caractérisation de l'interprétation à peu près consensuelle.

2.4 Une proposition : l'interprétation d'une théorie physique fournit une image du monde

On a vu dans les deux sections précédentes (sections 2.2 et 2.3) la diversité des conceptions de ce qu'est l'interprétation d'une théorie. Elles dépendent notamment de la façon dont on conçoit une théorie scientifique. Pourtant, en dépit de ces divergences, la littérature scientifique et philosophique fait référence à des « interprétations » d'une théorie comme à des éléments assez bien définis et qui ne varient pas

[11] Van Fraassen (1991), p. 242.

en fonction de l'approche syntaxique ou sémantique que l'on peut adopter. C'est le cas par exemple en mécanique quantique de l'interprétation de Copenhague ou de celle d'Everett. Cela suggère que ces « interprétations » ont des caractéristiques qui dépassent certains clivages philosophiques. Pour référer à elles de manière relativement neutre, je vais proposer une définition de travail qui se veut consensuelle. Je vais montrer que cette définition peut être fédératrice par-delà les différences de conceptions des théories scientifiques. Il apparaîtra au chapitre suivant que cette définition permet de caractériser adéquatement les interprétations quantiques.

Je propose la définition de travail suivante :

> l'interprétation d'une théorie fournit l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie, c'est-à-dire qu'elle précise les types d'entités et de propriétés que comporte ce monde.

Il me semble que cette définition peut être comprise de trois façons, qui toutes concourent à la rendre acceptable.

La première réside dans les positions défendues par Wilfrid Sellars (1962). Sellars s'intéresse à l'image qu'on peut avoir de l'homme et il distingue deux perspectives qui conduisent à donner deux images différentes. La première est l'*image manifeste* : c'est le cadre dans lequel l'homme est venu à être conscient de lui-même, en tant qu'homme dans le monde. La seconde est l'*image scientifique* : elle résulte de la postulation d'entités par les différentes sciences. Ces entités peuvent être des objets imperceptibles ou donner lieu à des processus sous-jacents, qui permettent de rendre compte des régularités observables[12]. Sellars dirait ainsi que c'est l'interprétation d'une théorie qui fournit une image scientifique. Qu'est-ce exactement qu'une image selon Sellars ? En dépit du terme employé, elle consiste non pas tant en des « choses imaginées » que « conçues », qui est une notion plus large[13]. Sellars utilise d'ailleurs aussi, au lieu d'« image », l'expression de « cadre conceptuel »[14], pour désigner un ensemble de concepts qui forme un tout. Pour Sellars, une question fondamentale pour une image est « de quelle sorte sont les objets de base du cadre ? »[15]. C'est-à-dire qu'une image se définit par ses objets fondamentaux (susceptibles de se regrouper en d'autres objets plus gros). Il faut également préciser les propriétés et les relations qui caractérisent ces objets. Pour Sellars, il ne s'agit pas tant d'énumérer des objets que d'en donner

[12]Sellars souscrit en effet à une distinction entre observable et non-observable, mais elle n'est pas essentielle pour ce que je souhaite retenir de l'image scientifique.

[13]Sellars (1962), p. 3.

[14]Sellars (1962), p. 4. Je prends ici les deux expressions pour synonymes.

[15]Sellars (1962), p. 5.

une classification et de les caractériser. Par exemple, classifier des propriétés peut consister à distinguer entre des propriétés objectives, relationnelles ou contextuelles. Sellars n'est pas le seul à défendre l'idée selon laquelle interpréter une théorie revient à fournir une image du monde. Einstein, dans une conférence de 1918, parle de « l'image du monde » du physicien théoricien. Van Fraassen reprend à son compte l'expression de Sellars pour le titre de son livre *The Scientific Image* (1980)[16] et l'applique non pas seulement à l'homme mais au monde dans son ensemble. Dans son livre sur la philosophie de la mécanique quantique (van Fraassen, 1991), il reprend l'idée que l'interprétation de la théorie doit donner une image du monde. Certains articles récents qui discutent de l'interprétation de la mécanique quantique sont explicitement posés dans les termes de Sellars[17] ; d'autres, s'ils n'utilisent pas le terme d'« image », emploient une expression proche. Par exemple, lorsque John Bell, un acteur majeur de la mécanique quantique, présente plusieurs interprétations de la mécanique quantique, il intitule son article « Six Mondes Possibles en Mécanique Quantique » et il utilise l'expression de « visions du monde »[18].

Une deuxième façon de comprendre la caractérisation que j'ai proposée est celle de l'interprétation au sens sémantique (cf. section 1). Pour une théorie exprimée dans un langage formel L, une interprétation consiste en un domaine D des individus qui servent de référents aux variables de la théorie. Interpréter une théorie, c'est donner un ensemble d'entités auquel la théorie se rapporte : c'est dire ce qui peut composer le monde, si la théorie est vraie. Aussi, lorsque je dis dans ma définition de travail que la théorie est *vraie* dans le monde proposé par l'interprétation, c'est dans ce sens sémantique (ses axiomes sont satisfaits dans ce monde) et non pas forcément dans un sens réaliste (ces entités existent véritablement). C'est ce qu'exprime Belousek, dans une discussion de l'interprétation de la mécanique de Bohm (qui est l'une des formulations de la mécanique quantique) :

> « Il y a deux questions qui doivent être posées [...]. La première question concerne les sortes d'entités qui peuplent un monde que la mécanique de Bohm décrit, tandis que la seconde concerne les propriétés qui qualifient ces entités. »[19]

On retrouve ici, comme chez Sellars, l'idée que l'interprétation d'une théorie doit spécifier les types d'entités (ne pas seulement en produire une liste) et donner leurs propriétés.

[16] Van Fraassen indique expressément cet emprunt, p. vii.
[17] Cf. par exemple Dorato et Esfeld (2009), p. 42.
[18] Bell (1987), p. 181-195.
[19] Belousek (2003), p. 128.

Une troisième façon de comprendre la définition de l'interprétation que je propose est à travers l'idée que défend Hughes (1989). Il adopte explicitement le cadre d'une approche sémantique[20]. Interpréter une théorie, c'est « voir quel genre de monde est représentable au sein de la classe des modèles que la théorie emploie »[21]. En considérant les modèles qui représentent les phénomènes, on repère des caractéristiques communes afin d'imaginer comment pourrait être le monde pour que ces modèles le représentent. Il dit aussi : « nous interprétons la théorie en reconnaissant, dans les modèles que la théorie fournit, des éléments d'un schéma conceptuel particulier »[22]. Ainsi, la caractéristique d'un monde passe par sa compatibilité avec un certain « schéma conceptuel ». Hughes donne l'exemple de la mécanique classique, pour lequel ce schéma contient

> « tout d'abord, une distinction entre un *système* et ses *attributs* (ou *propriétés*) et, deuxièmement, une explication totalement *causale* des processus. »[23]

C'est-à-dire que le schéma conceptuel de la mécanique classique repose sur des particules avec des propriétés objectives et sur l'existence de forces qui sont les causes des processus. Le « schéma conceptuel » de Hughes rejoint donc le « cadre conceptuel » de Sellars : il s'agit d'une spécification des types d'objets qui existent et de leurs propriétés — une image, au sens de Sellars.

J'ai proposé ici une caractérisation de ce qu'est une interprétation d'une théorie, en terme d'une image d'un monde, qui spécifie les types d'objets et de propriétés qui composent ce monde. J'ai montré qu'une telle définition est compatible avec diverses positions et notamment celle de Sellars. C'est dans ce sens que j'utiliserai à présent ce terme, en parlant par exemple de la diversité des interprétations de la mécanique quantique : je veux dire que chacune propose des images du monde différentes, avec des types d'objets et de propriétés différentes. C'est ce qu'il apparaîtra dans le prochain chapitre, lorsque ces différentes interprétations seront présentées.

En disant que l'interprétation doit spécifier les objets et les propriétés d'un monde dans lequel la théorie est vraie, je n'entends pas forcément que ceux-ci doivent être complètement déterminés par cette interprétation. Par exemple, une interprétation peut seulement indiquer que tel type de propriété (par exemple, les propriétés objectives) n'est pas admissible. Une autre interprétation pourra être plus complète, en indiquant que les propriétés doivent être exclusivement contextualistes. Dans tous

[20] Cf. p. xii et 257.
[21] Hughes (1989), p. 175.
[22] Hughes (1989), p. 175.
[23] Hughes (1989), p. 301.

les cas, même si elle reste incomplète sur certains points, une interprétation a pour conséquence de se prononcer sur les objets et les propriétés possibles.

2.5 Quelques questions générales sur l'interprétation d'une théorie

Pour terminer cette introduction à ce qu'est l'interprétation d'une théorie, je propose de considérer quelques questions générales. Elles permettront de lever, je l'espère, quelques ambiguïtés possibles.

2.5.1 Une théorie physique a-t-elle besoin d'une interprétation ?

Certains ont défendu l'idée selon laquelle une théorie n'a pas besoin d'interprétation. On distingue deux types d'arguments en faveur d'une telle idée. Selon le premier, ce qui suffit pour une théorie est de savoir comment l'appliquer et la comparer à l'expérience. Elle n'a pas besoin, en plus de cela, d'une interprétation qui viendrait spécifier les entités dont se compose le monde. C'est par exemple à peu près la teneur de l'article de Fuchs et Peres (2000), intitulé « Quantum Mechanics Needs no Interpretation ». Cette position, on l'aura compris, s'apparente à un instrumentalisme : les théories ne servent qu'à prédire des résultats expérimentaux et n'ont pas à proposer une image du monde. Une telle position repose sur une conception particulière de ce qu'est une interprétation. Il faut que la façon dont la théorie formelle acquiert du contenu empirique ne soit pas de « l'interprétation », c'est-à-dire n'ait aucune conséquence vis-à-vis des entités qui composent le monde. Autrement dit, il faut que l'interprétation empirique (ou instrumentaliste) de la théorie puisse être indépendante de l'interprétation au sens d'une image du monde. Or il semble que cela n'est pas tout à fait exact. Pour pouvoir seulement appliquer la théorie empiriquement, il est nécessaire de préciser ce qui est susceptible de faire l'objet de prédictions. Cela revient à prendre parti, au moins implicitement, sur ce qui peut composer le monde. Je le montrerai plus précisément pour mécanique quantique au chapitre 2, section 4.3. Cette conception peut aussi être rapprochée de celle de Nagel, dont je discute au chapitre 3, section 1.4.

Un autre argument est qu'une théorie ne doit pas être simplement interprétée mais doit plutôt être reconstruite à partir de principes physiques. C'est une position qui trouve un certain écho en mécanique quantique ; par exemple, l'article de Grinbaum (2007b) a pour titre explicite « Reconstructing Instead of Interpreting Quantum Theory », où la « reconstruction » doit se faire selon des principes physiques[24]. Une

[24]Pour d'autres propositions de reconstructions de la mécanique quantique en ce sens, on peut

telle argumentation s'appuie de façon explicite sur une distinction d'Einstein entre les théories constructives et les théories à principes, l'idée étant que le premier type de théorie doit recevoir une interprétation, tandis que le second n'en a pas besoin. Einstein proposait la distinction suivante[25] :

> « En physique, on peut distinguer des théories de natures différentes. La plupart sont des théories constructives : au moyen d'un système de formules relativement simple placé à la base, elles cherchent à construire une image de phénomènes plus complexes. [...] Mais à côté de cette classe importante de théories, il y en a une deuxième, que j'appellerai les théories à principes, qui, au lieu de la méthode synthétique, emploient la méthode analytique. Ici, le point de départ et la base ne sont pas constitués par des éléments de construction hypothétique, mais par des propriétés générales trouvées empiriquement, des phénomènes naturels, principes d'où découlent ensuite des critères mathématiques formulés, auxquelles les phénomènes particuliers ou leurs images théoriques doivent satisfaire. »[26]

Les théories constructives s'appuient sur des éléments de base hypothétiques. Einstein donne l'exemple de la théorie cinétique des gaz, qui postule l'existence de molécules en mouvement. Cela revient à dire que les théories constructives proposent des entités fondamentales, à partir desquelles elles reconstruisent d'autres phénomènes. Cela correspond à la définition que j'ai donnée de l'interprétation comme une image du monde, en en précisant les objets. Einstein utilise d'ailleurs l'expression d'« images de phénomènes ». À l'opposé, les théories à principes partent de principes physiques, qui sont « des propriétés générales ». Par exemple, la thermodynamique s'appuie sur le principe de la conservation de l'énergie et celui de l'impossibilité de certains types de transformations. Ces principes ne fournissent-ils pas d'image du monde ? Il me semble que si : ils sont, de l'aveu même de leurs partisans, des « principes physiques »[27], c'est-à-dire qu'ils portent directement sur le monde et doivent avoir une signification physique claire. Il s'agit de

> « un ensemble d'énoncés ('postulats', 'principes') physiques simples *à propos du monde* »[28]

citer Rovelli (1996), Hardy (2001), Clifton, Bub et Halvorson (2003).

[25]Une distinction similaire peut être aussi attribuée antérieurement à Lorentz, cf. Frisch (2005).

[26]Einstein (1919).

[27]Par exemple, cf. Grinbaum (2007a), p. 389, 393-397 et 405.

[28]Rovelli (1996), p. 2. Je souligne.

Ces énoncés à propos du monde reviennent à prendre position sur les objets qui le composent : ils encadrent l'image possible du monde (souvent, sous la forme de principes d'impossibilité). Les théories à principes fournissent bel et bien une interprétation au sens d'une image d'un monde dans lequel la théorie serait vraie. Comment faut-il alors comprendre le slogan « reconstruire, ne pas interpréter » ? Il me semble qu'il faut l'entendre comme une invitation à loger les éléments interprétatifs au cœur de la formulation axiomatique de la théorie et à ne pas se contenter de la rajouter après coup à une formulation de la théorie. D'une certaine façon, les éléments interprétatifs (« physiques ») tiennent le premier rôle dans les théories à principes ; la formulation mathématique de la théorie doit en être dérivée.

J'ai indiqué que ceux qui prétendent se passer de l'interprétation d'une théorie ne tiennent pas leurs promesses de façon littérale : une interprétation au sens de la section 2.4 est nécessaire à toute théorie scientifique pour qu'elle ait un contenu empirique. En revanche, il est tout à fait vrai que certaines interprétations pourront être plus fournies que d'autres. Il est possible d'avoir une interprétation minimale, qui se limite à ce qui est nécessaire pour une utilisation instrumentaliste de la théorie et qui ne postule pas l'existence d'objets indépendants derrière des résultats de mesures. J'en donnerai un exemple au chapitre suivant, section 1.3.

Dans la suite de ce travail, je ne considérerai pas les reconstructions de la mécanique quantique qui ont été proposées pour en faire une théorie à principes. Il semble en effet que ces interprétations de la mécanique quantique ne sont pas beaucoup employées dans la communauté scientifique, comparativement à d'autres interprétations.

2.5.2 Une interprétation est-elle falsifiable ?

Une autre question importante portant sur l'interprétation d'une théorie est : est-elle falsifiable ? C'est-à-dire, est-il possible de trouver des situations expérimentales qui en infirment ses prédictions expérimentales et montrent que l'image du monde qu'elle définit est erronée ? Une première réponse immédiate peut être donnée : une interprétation est falsifiable, dans la mesure où elle a, entre autres rôles, celui de donner un contenu empirique à une théorie. Rappelons qu'une théorie formelle non-interprétée n'a pas de contenu empirique et n'est ni vraie ni fausse. Par conséquent, proposer une image du monde particulière est une entreprise qui peut être soumise au verdict de l'expérience. Par exemple, du XVIIe au XIXe siècle, deux théories de la lumière se sont affrontées, proposant des images du monde très différentes. L'une tenait la lumière pour être une onde qui se propageait et avait pour partisans Huygens,

Fresnel ou Young. L'autre supposait que la lumière était composée de particules (des « grains de lumière ») et était notamment défendue par Descartes, Newton et Malus[29]. Ces théories concurrentes, avec leur interprétation, conduisaient à des prédictions semblables en de nombreux points, mais pas pour ce qui était de savoir si la lumière se propageait plus vite dans l'air que dans l'eau. En 1850, Foucault parvient à trancher le résultat expérimentalement en faveur de la conception ondulatoire de la lumière. L'image du monde où la lumière serait corpusculaire était falsifiée.

De ces considérations, il ne faudrait pas penser qu'une proposition quelconque sur le monde est falsifiable. Quelques décennies après l'expérience de Foucault, la théorie de la mécanique quantique remit au goût du jour l'idée d'un comportement corpusculaire de la lumière, avec l'hypothèse des photons. Un aspect d'une image du monde, abandonné avec une théorie, peut ressurgir avec une autre. De façon générale, même pour une théorie donnée, plusieurs interprétations restent possibles. L'expérience en écarte certaines, mais n'en détermine pas qu'une seule. On dit que l'interprétation — au sens d'une image du monde — est sous-déterminée par l'expérience. C'est ainsi que pour la mécanique quantique plusieurs interprétations de la théorie sont empiriquement équivalentes et toutes aussi bien justifiées l'une que l'autre. Vis-à-vis du verdict de l'expérience, des images du monde diverses sont tout aussi légitimes. Comme on le verra au chapitre suivant, certaines proposent l'image d'un monde indéterministe et d'autres celle d'un monde déterministe. Aussi, la question de savoir si, selon la mécanique quantique, le monde est fondamentalement déterministe ou indéterministe n'est pas une question décidable empiriquement. L'interprétation d'une théorie est falsifiable, mais pas déterminée de façon unique par l'expérience.

Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai introduit la notion d'interprétation d'une théorie, à partir de la notion d'interprétation sémantique en mathématiques. Plusieurs rôles peuvent être attribués à l'interprétation d'une théorie physique : donner un contenu empirique à la théorie formelle, proposer une image du monde et apporter une compréhension. Si la définition de ce qu'est une interprétation n'est pas consensuelle, car elle doit reposer sur la définition de ce qu'est une théorie scientifique elle-même, j'ai proposé une caractérisation qui permet d'en saisir les principaux traits (en attendant une discussion plus poussée au chapitre 3) : l'interprétation d'une théorie physique fournit

[29]Pour une histoire plus fidèle des subtilités des diverses positions, je renvoie à Chappert (2007) et Locqueneux (2009).

l'image d'un monde dans lequel la théorie serait vraie, c'est-à-dire qu'elle spécifie les types d'objets et de propriétés qui composent ce monde. Voilà, à gros traits, ce qu'il faut attendre des interprétations de la mécanique quantique qui seront présentées dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Présentation de plusieurs interprétations quantiques

Introduction

Après que le premier chapitre a introduit ce qu'est l'interprétation d'une théorie, on est en mesure d'étudier de plus près ce qui fait l'objet de cette thèse : les diverses interprétations de la mécanique quantique. Ce chapitre présente plusieurs interprétations quantiques parmi celles qui sont les plus importantes aujourd'hui. Ces interprétations sont celles qui joueront un rôle dans les chapitres ultérieurs, à travers des exemples de travaux scientifiques.

Commençons par revenir brièvement sur l'histoire des interprétations de la mécanique quantique. La mécanique quantique a connu, dès ses premières années, des controverses à propos de son interprétation, dont certaines perdurent encore. Lorsque la théorie a été élaborée dans les années 1920, des divergences de vues sont immédiatement apparues. En 1926, Erwin Schrödinger et Werner Heisenberg proposaient des images du monde très différentes pour la même théorie. Le premier considérait les phénomènes quantiques sous la forme d'ondes ; le second insistait sur le caractère discontinu des phénomènes et sur le concept de corpuscule. Plus tard, Albert Einstein et Niels Bohr se sont opposés dans des débats restés célèbres. Einstein insistait sur le caractère incomplet de la théorie, refusant que le caractère probabiliste des événements puisse être pris pour une caractéristique fondamentale du monde. De son côté, Bohr acceptait que les prédictions soient probabilistes et il défendait le caractère complémentaire des phénomènes atomiques (qui dit par exemple que les concepts d'onde et de corpuscule sont tous deux appropriés pour un électron, mais dans des

configurations expérimentales différentes). Avec d'autres physiciens tels que Heisenberg et Born, Bohr contribua à imposer rapidement dans la communauté physicienne une certaine interprétation. Elle a été appelée rétrospectivement « l'interprétation de Copenhague », en référence à la ville danoise où Bohr a travaillé. Cette interprétation dut néanmoins bientôt faire face à d'autres concurrentes. Dans les années 50, le physicien américain David Bohm proposa une nouvelle interprétation de la mécanique quantique, déterministe celle-ci — retrouvant des idées proposées plus tôt par Louis de Broglie. Peu après, Hugh Everett défendit une nouvelle interprétation quantique, en considérant que les états quantiques étaient relatifs à l'observateur, ou du moins à d'autres systèmes. Dernièrement ont été proposées des interprétations quantiques en terme d'information, d'histoires décohérentes, de propriétés modales, pour n'en citer que quelques-unes. Enfin, la multiplicité des interprétations quantiques est encore accentuée par le fait que chacune des interprétations qui a été évoquée a donné naissance à de multiples variantes (aussi, il serait plus exact de considérer qu'elles définissent des familles d'interprétations partageant certains traits communs).

Le constat est qu'il existe aujourd'hui une pluralité d'interprétations de la mécanique quantique. Ces interprétations sont discutées par les philosophes des sciences et elles sont aussi adoptées ou utilisées par les physiciens, avec des popularités variables. Présenter ces interprétations quantiques est une étape préliminaire indispensable qui me permettra, dans les chapitres ultérieurs, de discuter de ce que l'existence d'une pluralité d'interprétations change pour l'activité scientifique. J'ai insisté sur l'existence d'un très grand nombre d'interprétations : lesquelles méritent d'être présentées ? Je fais ici un double choix : tout d'abord, je me restreins aux quelques interprétations qui sont actuellement parmi les plus populaires chez les physiciens et dans une certaine mesure aussi chez les philosophes de la physique. La raison est simple : je souhaite discuter de la situation telle qu'elle existe actuellement dans la recherche en mécanique quantique. Je m'intéresse donc seulement aux interprétations qui, de manière factuelle, sont estimées et utilisées par les physiciens et dont il apparaîtra au chapitre 4 qu'elles ont joué un rôle en pratique dans certains travaux scientifiques majeurs. Ce choix ne reflète pas mes préférences pour l'une ou l'autre d'entre elles et je n'ai pas pour but ici d'argumenter en faveur de l'une ou de l'autre. Le second choix que je fais est de présenter chacune de ces interprétations seulement dans une version qu'on peut qualifier de médiane, parmi toutes les versions qui en ont été proposées. Ce faisant, mon objectif est seulement de présenter les grandes lignes des interprétations principales, afin qu'on puisse se faire une idée de leurs différences. La version médiane que je propose pour une interprétation ne correspond pas forcément à la ver-

sion exacte défendue par tel physicien ou philosophe. Je n'aurai pas non plus le soucis de reconstruire fidèlement l'évolution de l'interprétation d'un point de vue historique et là encore je donnerai une version moyenne du point de vue temporel. L'objectif est seulement de *présenter* certaines interprétations : il ne s'agit ni de détailler les problèmes auxquels chacune des interprétations fait face, ni de tenter de les résoudre.

Le plan du chapitre est le suivant. Les premières sections présentent les interprétations majeures de la mécanique quantique : l'interprétation contemporaine orthodoxe que l'on trouve dans les manuels (section 1), l'interprétation de Bohm (section 2) et l'interprétation des mondes multiples (section 3). Dans la section 4, je précise comment et en quel sens ces interprétations quantiques si différentes parviennent à être empiriquement équivalentes.

1 L'interprétation orthodoxe

Dans cette section, je présente l'interprétation qui est enseignée aux physiciens : celle que l'on trouve, au moins implicitement, dans la très grande majorité des manuels universitaires contemporains de mécanique quantique. Je qualifie cette interprétation d'« orthodoxe » parce qu'il s'agit de celle qui est enseignée, à quelques variations prêt, presque partout dans le monde[1]. La littérature philosophique ne discute pas toujours de cette interprétation des manuels[2]. La raison semble en être qu'elle est jugée insuffisamment rigoureuse d'un point de vue philosophique, en plus d'être généralement peu développée de façon explicite dans les manuels. La littérature préfère discuter de l'interprétation historique de Bohr par exemple, qui a connu des développements conséquents et des raffinements explicites (j'en parle également plus bas). Dans le projet qui est le mien, à savoir comprendre comment l'existence d'une pluralité d'interprétations affecte la recherche scientifique, il importe au contraire d'étudier les interprétations qui sont effectivement utilisées par les physiciens, même si elles ne sont pas les meilleures candidates au titre d'interprétation ultime de la mécanique quantique. Aussi, je vais reconstruire une interprétation orthodoxe contemporaine à partir de plusieurs manuels actuellement utilisés. Je la présente dans la section 1.1.

[1] Je reconnais que certains manuels s'en écartent, considérant plus ou moins brièvement d'autres interprétations. Il existe aussi des cours, dans des départements de philosophie et aussi dans des départements de physique, à propos de ces interprétations diverses (je renvoie pour cela aux exemples qui seront discutés au chapitre 4, section 2.2.3). Néanmoins, même eux reconnaissent que l'interprétation que je qualifie d'orthodoxe est celle qui est enseignée dans la très grande majorité des cas et qui à ce titre doit être éventuellement combattue.

[2] Une exception est par exemple Albert (1992), chapitre 2.

Ce sera l'occasion d'exposer dans la section 1.2 le problème conceptuel qui lui est traditionnellement attaché, qualifié de « problème de la mesure ».

Comme l'interprétation orthodoxe contemporaine est particulièrement importante dans la communauté physicienne, je prends le soin de distinguer deux variations qu'elle admet. La première est une version plus minimale de l'interprétation orthodoxe des manuels : je la présente dans la section 1.3. La seconde est celle qui a été défendue, dès les premières années de la théorie, par l'école dite « de Copenhague » autour de Bohr et de Heisenberg et qui s'imposa rapidement dans la communauté physicienne. Les manuels actuels ne reprennent pas l'ensemble des positions que ces physiciens ont défendues dans les années 20 à 50 ; ils sont certainement plus proches d'autres positions, défendues alors par Dirac et von Neumann[3]. Pour en tracer les grandes lignes, l'interprétation orthodoxe actuelle contient moins d'engagements interprétatifs et elle est une position davantage instrumentaliste, tandis que l'interprétation de Copenhague reposait sur des présupposés philosophiques plus marqués. Je réserve l'expression d'« interprétation orthodoxe des manuels » pour désigner l'interprétation contemporaine (présentée à la section 1.1) et celle d'« interprétation de Copenhague » pour désigner l'interprétation défendue historiquement par Bohr et Heisenberg, notamment — même s'il existe des différences entre les vues de ces deux derniers physiciens. Comme cette interprétation de Copenhague est historiquement à l'origine de l'interprétation orthodoxe actuelle et qu'elle est encore une référence pour un certain nombre de manuels plus anciens, je la présente à la section 1.4.

1.1 L'interprétation orthodoxe contemporaine des manuels

Présenter l'interprétation orthodoxe est l'occasion d'introduire aussi le formalisme mathématique habituel de la mécanique quantique. Je vais ainsi exposer la théorie de la mécanique quantique selon le point de vue de l'interprétation orthodoxe (section 1.1.1). Je synthétiserai ensuite l'image du monde qu'elle propose (section 1.1.2)[4], avant de faire quelques remarques sur la formulation mathématique de la théorie (section 1.1.3).

[3]Pour des aspects historiques des divergences au sein de l'interprétation « orthodoxe », cf. par exemple Freire (2005) et (2009).

[4]Ainsi que je serai amené à le défendre à la section 4, énoncer la théorie en donnant une interprétation empirique suppose toujours déjà certains choix interprétatifs. Je préfère donc assumer ce fait en présentant la théorie avec une certaine interprétation, de préférence celle qui est utilisée en physique, quitte à ce que l'interprétation en question contienne de nombreux présupposés.

1.1.1 Formulation de la théorie

Ma reconstruction s'appuie sur un certain nombre de manuels universitaires contemporains. Le premier d'entre eux est Griffiths (2004), qui domine actuellement le marché, au moins en Amérique du Nord[5]. D'autres manuels sont ceux de Cohen-Tannoudji, Diu et Laloë (1998), Gottfried et Yan (2003), Shankar (1994) ; Lévy-Leblond et Balibar (1984) est un manuel d'introduction en français. Ils peuvent être considérés comme des héritiers des manuels de Dirac (1930) et von Neumann (1955). À partir de ces manuels, je reconstruis une formulation de la théorie et une interprétation qui ne sont que des positions médianes par rapport au contenu des divers manuels.

Avant de présenter les axiomes de la théorie, je commence par en esquisser les idées générales. En mécanique quantique, il est nécessaire de préciser le *système* physique étudié : un électron, un noyau atomique, un ensemble constitué de trois atomes, un photon... La théorie représente ce système à un instant donné par un certain *état* mathématique. Notons que la notion d'état est déjà utilisée en mécanique classique[6], où il est donné par la position et le moment (la masse multipliée par la vitesse.) de la particule. L'état de mécanique classique permet de calculer les valeurs de toutes les propriétés à cet instant : par exemple son énergie cinétique, l'angle de sa trajectoire avec telle droite, la valeur de la force qu'exerce telle autre particule sur elle, etc. En mécanique quantique aussi, l'état qu'on attribue au système doit permettre de répondre à toutes les « questions expérimentales »[7] qui peuvent lui être adressées. On dit parfois que l'état « contient toutes les informations qu'il est possible d'obtenir sur le corpuscule »[8]. Du point de vue mathématique, l'état quantique est un vecteur de coordonnées complexes ; on le note généralement $|\psi(t)\rangle$. Comme l'état est un vecteur (appartenant à un espace vectoriel), la conséquence la plus importante est qu'une combinaison linéaire (avec des coefficients complexes) de plusieurs états est encore un état. On parle dans ce cas de *superposition* d'états — qui peut être réalisée expérimentalement. Un système dans un état superposé tient à la fois de l'un et de l'autre de ces états.

Lorsqu'on adresse une question expérimentale à un système quantique, l'état que lui attribue la théorie permet de formuler une prédiction théorique. Les prédictions quantiques ont la particularité d'être seulement probabilistes : il s'agit seulement des probabilités que tel ou tel résultat soit obtenu. Il n'y a que dans des cas particuliers

[5] Cf. par exemple l'étude menée par Dubson *et al* (2009) ainsi qu'Ismael (2009).
[6] Cf. par exemple Cohen-Tannoudji *et al* (1998), p. 214 et Hughes (1989), p. 58.
[7] Hughes (1989), p. 59 et 69.
[8] Cohen-Tannoudji, C. *et al* (1998), p. 19.

que la prédiction est certaine. En mécanique quantique, le résultat d'une mesure ne peut pas prendre des valeurs de façon continue mais seulement dans un ensemble discret. Supposons qu'on mesure une grandeur physique, par exemple l'énergie. La théorie quantique représente cette grandeur comme un opérateur mathématique. C'est le spectre[9] de cet opérateur qui détermine les valeurs possibles de la mesure. Pour ce qui est à présent de l'évolution temporelle de l'état, la mécanique quantique orthodoxe reconnaît deux évolutions différentes. La première se fait selon une équation différentielle déterministe, dite équation de Schrödinger. L'état évolue linéairement en fonction des interactions qu'il reçoit. La seconde évolution, plus exceptionnelle, a lieu lors d'une opération de mesure. En fonction du résultat expérimental de cette mesure, l'état se retrouve projeté (on dit aussi réduit) selon le vecteur correspondant au résultat de la mesure.

On est maintenant en mesure d'apprécier les axiomes de la théorie, dans une version simplifiée[10] :

1. **Représentation de l'état.** L'état d'un système est représenté par un vecteur $|\psi(t)\rangle$ d'un espace de Hilbert $\mathcal{E}$.[11]

2. **Représentation d'une grandeur physique.** Une grandeur physique mesurable $\mathcal{A}$ est représentée par un opérateur hermitien observable $\hat{A}$.[12]

3. **Résultat d'une mesure.** La mesure d'une grandeur physique $\mathcal{A}$ donne pour résultat l'une des valeurs propres a de l'observable $\hat{A}$, avec une probabilité donnée par $P(a) = |\langle a|\psi\rangle|^2$, où $|a\rangle$ est un vecteur propre unitaire de valeur propre

[9] Le spectre est l'ensemble des valeurs propres. On dit que a est une valeur propre d'un opérateur $\hat{A}$ s'il existe un vecteur non-nul X tel que $\hat{A}X = aX$.

[10] En particulier, j'adopte le formalisme dans lequel les opérateurs associés à une mesure sont des projecteurs (on parle en anglais de *projection-valued measurement*, PVM). Je n'utiliserai pas le formalisme, plus général, des opérateurs positifs (le formalisme dit *positive-operator-valued measurement*, POVM) ; cf. Peres (1993), p. 282-3. Je vais ici par exemple contre Wallace (2008, p. 21) qui affirme que « ce 'compte-rendu traditionnel' [celui que j'adopte] devrait être abandonné par les philosophes », au profit d'un compte rendu au moyen de POVMs. Je choisis néanmoins la présentation plus ancienne et plus simple, car mon objectif ici est seulement de donner une idée de l'énoncé de la théorie et de son interprétation et non pas de résoudre des problèmes conceptuels de l'interprétation en tant que tels. Une autre raison est que, si les POVMs sont ce que les physiciens de la mesure quantique utilisent, c'est encore la version simplifiée qui est enseignée aujourd'hui dans les cours de mécanique quantique, jusqu'à un niveau avancé.

[11] Un espace de Hilbert est un espace vectoriel sur les complexes, muni d'une norme qui découle d'un produit scalaire. Ici, le produit scalaire de deux vecteurs $|a\rangle$ et $|b\rangle$ est noté $\langle a|b\rangle$.

[12] « Hermitien » signifie que l'opérateur est auto-adjoint : $\hat{A}^+ = \hat{A}$. « Observable » signifie que les vecteurs propres de l'opérateur forment une base. Cela est automatique dans un espace de Hilbert de dimension finie, mais pas de dimension infinie.

a (c'est la règle dite de Born)[13].

4. **Projection de la fonction d'onde.** Après qu'une mesure ait donné le résultat a, l'état du système immédiatement après la mesure est $|a\rangle$.

5. **Évolution de l'état.** En-dehors d'une mesure, le vecteur d'état $|\psi(t)\rangle$ évolue dans le temps selon l'équation de Schrödinger ($\hat{H}(t)$ est l'opérateur hamiltonien) :

$$i\hbar\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}|\psi(t)\rangle = \hat{H}(t)|\psi(t)\rangle \tag{2.1}$$

Les deux premiers postulats précisent les outils mathématiques utilisés. Le troisième postulat fait le lien entre le formalisme mathématique et les résultats empiriques. Les quatrième et cinquième postulats décrivent l'évolution de l'état quantique en fonction du temps. On note que ces deux postulats donnent deux règles différentes pour l'évolution de l'état ; l'application de l'une ou de l'autre dépend de l'existence d'une mesure. Certains manuels ajoutent le postulat selon lequel que les opérateurs quantiques s'obtiennent à partir des grandeurs correspondantes classiques, pour le même problème traité en mécanique classique[14].

1.1.2 L'image orthodoxe du monde

L'interprétation orthodoxe de ces postulats, c'est-à-dire l'image orthodoxe du monde, est la suivante. Tout d'abord, la fonction d'onde n'est pas prise comme une entité du monde, ou référant à un objet du monde. Elle est seulement considérée comme un outil prédictif, qui permet de calculer les différentes probabilités de mesure. Ce ne sont pas les états des systèmes, mais les systèmes quantiques eux-mêmes qui ont le statut d'entités, au sens où ils composent l'image du monde et peuvent recevoir des propriétés. On considère qu'un système n'a de propriété que lorsque son état est tel que le résultat d'une mesure de cette propriété serait prédit par la théorie avec une probabilité 1. Cela suppose que l'état soit un vecteur propre de l'observable associée à la propriété en question. En d'autres termes, un système a la propriété « $A = a$ » si et seulement si $|\psi(t)\rangle = |a\rangle$. On dit dans ce cas que le système admet une valeur déterminée (« a sharp value », en anglais). Un exemple est un système qui vient de

[13] Pour simplifier, je suppose ici que la valeur propre a n'est pas dégénérée, c'est-à-dire que l'espace propre de valeur propre a est de dimension 1 et que $|a\rangle$ en est un vecteur unitaire.

[14] Avec néanmoins quelques subtilités : cf. par exemple Cohen-Tannoudji *et al* (1998), p. 137-138.

subir une mesure de A et pour lequel le résultat de la mesure est a : d'après le postulat 4 de la projection de l'état, le système est dans l'état $|a\rangle$ et on peut affirmer qu'il possède la propriété « $A = a$ ». Un contre-exemple est l'électron dont l'état de spin[15] selon z est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$. Une mesure du spin selon z donnera le résultat $|\uparrow\rangle$ avec une probabilité 1/2 et le résultat $|\downarrow\rangle$ avec une probabilité 1/2 : le système n'admet pas de propriété vis-à-vis du spin selon z. Dans le cas général, l'état d'un système n'est *pas* un vecteur propre d'un opérateur donné. On doit donc considérer qu'un système ne possède pas, de manière générale, de propriété vis-à-vis de sa position, de sa vitesse, ou de son spin. C'est ainsi que l'interprétation orthodoxe n'attribue pas de trajectoire aux électrons dans l'expérience des fentes d'Young. Cette expérience célèbre consiste à diriger un faisceau d'électrons (initialement, l'expérience concernait un faisceau de lumière) vers une plaque qui n'est percée que de deux petits trous rapprochés ; on détecte les électrons à bonne distance derrière la plaque, sur un écran. On observe expérimentalement une figure d'interférences : l'intensité sur l'écran lorsque les deux trous sont ouverts n'est pas la somme des intensités lorsque chacun des trous est seul ouvert. L'interprétation orthodoxe de l'expérience n'est pas qu'un électron emprunte l'un ou l'autre des trous. Elle dit plutôt que le concept de trajectoire ne s'applique pas au niveau de la plaque et, par conséquent, qu'il n'y a pas lieu de raisonner avec la trajectoire d'un électron ou de demander par quel trou il est passé.

Dans l'image orthodoxe du monde, les faits concernent des résultats de mesures existants, ou qui peuvent être prédits avec certitude. Considérons par exemple l'expérience suivante, qui est décrite dans les termes du langage courant. Un atome radioactif est placé devant un compteur Geiger ; au bout d'un certain temps, le compteur émet un « clic », indiquant que l'atome s'est désintégré. Selon l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, il existe un fait à propos de la désintégration de l'atome au temps t. En l'occurrence, l'expérience montre que la désintégration a eu lieu. L'interprétation orthodoxe fournit donc l'image d'un monde dans lequel l'atome est désintégré. Ces remarques peuvent sembler triviales, mais elles méritent d'être précisées car je présenterai d'autres interprétations qui s'écartent du sens commun et sont en désaccord avec ces positions.

L'interprétation orthodoxe fournit l'image d'un monde *indéterministe*. Selon elle, les probabilités de mesures (au travers du postulat 3) sont à interpréter comme des probabilités objectives. Elles reflètent un hasard fondamental : lors d'une mesure,

[15] Le spin est une propriété quantique, qui n'a pas d'analogue classique. Elle présente cependant certaines similitudes avec le moment magnétique, ou une aimantation. Le spin se mesure selon une direction, par exemple z. Pour un électron, le résultat d'une mesure de spin peut prendre seulement deux valeurs, qu'on note ici $|\uparrow\rangle$ et $|\downarrow\rangle$.

l'état du système subit une modification aléatoire. On dit que la mesure perturbe le système microscopique de façon fondamentale et incontrôlable. Ainsi, les probabilités quantiques ne reflètent pas une ignorance de notre part et l'interprétation orthodoxe affirme que ces prédictions probabilistes ne sont pas dépassables en principe : rien ne permet de prédire mieux que le formalisme quantique quel résultat de mesure va être effectivement observé[16]. Considérons par exemple un électron dont l'état de spin selon z est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$; la probabilité que la mesure du spin selon z soit $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$ est à chaque fois de 1/2. Dans l'image orthodoxe du monde, rien ne détermine quel état ($|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$) sera effectivement observé. Il n'y a pas de « variable cachée » supplémentaire que la mécanique quantique orthodoxe manquerait : les prédictions ne peuvent être que probabilistes car le monde est fondamentalement indéterministe. L'interprétation orthodoxe prétend décrire complètement les systèmes quantiques à travers la donnée de leur fonction d'onde. De nombreux manuels insistent sur la différence de l'interprétation orthodoxe des probabilités avec celle de la mécanique statistique. Les prédictions de cette théorie sont aussi des probabilités, mais celles-ci sont interprétées épistémiquement. C'est-à-dire qu'il existe des paramètres (en l'occurrence, positions et impulsions de toutes les particules individuelles) qui déterminent en principe le résultat d'une mesure. Comme la mécanique statistique ne cherche à prédire que des moyennes, elle renonce à la donnée de tous ces détails. En mécanique statistique, les probabilités ne reflètent que la méconnaissance des états exacts des systèmes individuels ; la théorie ne prétend pas être une description complète du système. La mécanique quantique interprétée de façon orthodoxe se veut à l'inverse une description complète, où les probabilités reflètent un hasard fondamental. Il existe néanmoins un aspect déterministe dans la théorie : l'équation de Schrödinger, qui régit l'évolution de l'état du système en dehors des opérations de mesure, est déterministe. Par conséquent, l'évolution d'un système entre deux mesures est déterministe et ce n'est que lors d'une mesure que le système subit une évolution indéterministe.

L'image du monde orthodoxe est *non-locale* : les propriétés d'une partie d'un système quantique peuvent être modifiées instantanément à distance par une action sur une autre partie de ce système. Considérons par exemple un état dit EPR[17] : une paire d'électrons est préparée dans l'état de spin $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle)$. Cela signifie que les deux électrons sont dans des états intriqués : on ne peut pas isoler (mathémati-

[16] Je me restreins ici à ce qu'on appelle les *états purs*, qui sont représentés par des vecteurs. Les *états mixtes*, qui sont représentés par des matrices densités, représentent une ignorance de notre part vis-à-vis de la distribution statistique d'états purs ; l'interprétation des probabilités est dans ce cas en partie épistémique.

[17] En référence au paradoxe présenté par Einstein, Podolsky et Rosen (1935).

quement : factoriser) ce qui dépend de l'électron 1 et ce qui dépend de l'électron 2. Une conséquence est que ni l'un ni l'autre ne possède de propriété vis-à-vis du spin, car aucun n'est dans un état propre de l'opérateur de spin. Cette caractéristique est essentielle à l'expérience imaginée. Elle consiste à envoyer le premier électron à une distance arbitraire du second, puis à réaliser une mesure de spin sur l'électron 1. Supposons que le résultat de cette mesure soit $|\uparrow\rangle$. Selon le postulat de projection, le système s'est réduit sur le sous-espace propre correspondant à ce résultat : les deux électrons sont maintenant décrits par l'état $|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle$ sur lequel ils ont été projetés. Par conséquent, l'électron 2 se trouve maintenant dans un état propre du spin ; on peut dire qu'il a la propriété d'avoir un spin $|\downarrow\rangle$. Or il ne l'avait pas avant que la mesure ne soit effectuée sur l'électron 1, à une distance arbitrairement éloignée. Cela signifie que la mesure du spin de l'électron 1 a modifié instantanément à distance l'état de l'électron 2 : on dit qu'il existe une interaction non-locale. D'où provient, dans la théorie orthodoxe, cette non-localité ? C'est le postulat de réduction qui en est responsable. Il s'applique en effet à toute fonction d'onde, qui peut être spatialement étendue. Les effets sont particulièrement visibles lorsque la réduction s'applique à une fonction d'onde pour des sous-systèmes intriqués et spatialement séparés. Cette non-localité est cependant limitée : on montre qu'elle ne permet pas la transmission de signaux à distance de manière instantanée.

Revenons à présent sur l'existence de deux règles d'évolution distinctes, qui s'appliquent dans des situations différentes (lors d'une opération de mesure, ou en-dehors d'elle). Cette distinction suppose qu'une opération de mesure constitue un type d'interaction différent, qui se traduit par une règle d'évolution à part. La notion de mesure du système quantique repose sur une distinction de quelque chose qui n'est pas ce système : l'image orthodoxe du monde est divisée en deux. On trouve d'une part le système quantique, soumis à l'équation de Schrödinger, et d'autre part un monde classique qui contient l'appareil de mesure et dont l'interaction avec le premier (lors d'une mesure) est responsable de la projection de la fonction d'onde. L'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique suppose que soit reconnue une partie du monde classique — par exemple, l'appareil de mesure — qui interagit avec le système quantique et qui est à même d'enregistrer un résultat de mesure. Il faut noter que la limite entre les deux parties du monde classique et quantique n'est pas définitive : par exemple, la théorie peut être appliquée à un système plus grand, qui englobe l'instrument de mesure initial (à condition de définir une autre partie du monde qui soit classique). Même si elle peut changer en fonction de l'expérience, une distinction entre une description classique et quantique est indispensable pour l'interprétation

orthodoxe de la mécanique quantique.

On note que l'interprétation orthodoxe est assez minimaliste par certains aspects : elle n'attribue pas de propriété à un système en toute occasion, mais seulement lorsque l'état du système est un vecteur propre de l'observable. Elle ne cherche donc pas à décrire une réalité à chaque instant. Elle se contente de rendre compte des résultats de mesures, qui est l'un des rares moments après lesquels les systèmes ont des propriétés. Ce faisant, l'interprétation orthodoxe présente certains traits de l'instrumentalisme : elle fait de la mécanique quantique un simple instrument pour prédire des phénomènes observables, les résultats de mesures macroscopiques. Elle ne se prononce pas beaucoup plus que cela sur l'image du monde. L'interprétation orthodoxe peut aussi être qualifiée d'opérationnaliste. Selon l'opérationnalisme, la signification des concepts théoriques provient de la façon dont les grandeurs peuvent être mesurées. Cela correspond à ce qu'exige l'interprétation orthodoxe : le fait qu'un système ait une propriété signifie exactement, selon elle, qu'elle puisse être mise en évidence par une procédure expérimentale avec une probabilité 1.

1.1.3 Remarques concernant la formulation de la théorie

La formulation de la théorie que j'ai présentée, au moyen des six postulats, est celle la plus *naturelle* pour l'interprétation orthodoxe. Je veux dire par là trois choses. La première est que la formulation emploie ou met en évidence de façon directe les concepts de cette interprétation. Par exemple, elle utilise les concepts de système, d'état du système, de résultat d'une mesure. D'autres formulations de la théorie — par exemple, celles qui seront présentées pour les interprétations bohmienne et everettienne, section 2.2 p. 63 et section 3.1 p. 67 — n'emploient pas ces concepts. Le deuxième point est que certaines caractéristiques de l'image du monde proposée par l'interprétation peuvent être facilement reliées à la formulation de la théorie. Par exemple, l'indéterminisme de l'interprétation peut être associé au postulat 5 et au phénomène de la mesure ; les conditions d'existence des propriétés se relient facilement au postulat 3. Inversement, il apparaîtra que les concepts centraux des interprétations bohmienne et everettienne ne sont pas mis en évidence par la présente formulation orthodoxe de la théorie. La troisième façon dont la formulation de la théorie semble naturelle pour l'interprétation est purement factuelle : on observe que les physiciens qui adoptent l'interprétation orthodoxe utilisent cette formulation pour énoncer la théorie. Ils n'emploient pas les autres formulations de la théorie (présentées aux sections 2.2 et 3.1, qui se relient plus naturellement aux autres interprétations. On peut

supposer que les physiciens orthodoxes choisissent de fait cette formulation « naturelle » précisément en raison des deux premières caractéristiques que j'ai indiquées.

Pour ces trois raisons, je parlerai de la formulation (mathématique) naturelle d'une théorie selon une interprétation, ou de la formulation de la théorie associée à une interprétation. Ce faisant, je ne veux pas nier le fait qu'une interprétation puisse s'accommoder d'autres formulations de la théorie que celle qui lui est naturellement associée. C'est d'ailleurs ce que j'établirai à la section 4. Je veux juste souligner le lien privilégié qui existe entre une interprétation et une formulation de la théorie.

1.2 Le problème de la mesure

L'interprétation orthodoxe est très largement acceptée dans la communauté scientifique. Cela est le cas en dépit d'un problème conceptuel, appelé traditionnellement « problème de la mesure », qui ronge cette interprétation depuis ses débuts sous d'autres versions (je présenterai plus bas l'interprétation historique de Copenhague). Par problème conceptuel, je veux dire que la formulation de la théorie et son interprétation, présentent un problème de cohérence interne. D'un autre côté, l'application de la théorie à l'expérience ne pose pas de problème : la formulation orthodoxe de la théorie permet à tout physicien de l'employer pour formuler des prédictions, lesquelles bénéficient d'un accord extraordinairement bon avec l'expérience. La présente section a pour but de présenter brièvement en quoi consiste ce « problème de la mesure »[18].

Le problème de la mesure vient de l'existence de deux règles d'évolutions pour l'état du système. Elles correspondent à deux postulats différents (4 et 5) : d'une part, l'équation de Schrödinger décrit l'évolution en dehors d'une mesure ; d'autre part, le postulat de projection de la fonction d'onde décrit l'évolution lorsqu'une mesure est effectuée sur le système. Ces règles d'évolution sont incompatibles et ne peuvent s'appliquer simultanément : la première est déterministe et continue, la seconde est indéterministe et discontinue. Le problème de la mesure vient du fait que la théorie ne définit pas les circonstances dans lesquelles les deux règles différentes s'appliquent. Autrement dit, le terme de « mesure » n'est pas défini par la théorie. La mécanique quantique orthodoxe ne donne pas de limite à ce qui vaut comme mesure. Elle est, selon les termes de Bell, « ambiguë par principe »[19]. J'ai indiqué plus tôt (section 1.1.2) que cette frontière change au gré des utilisations de la théorie : elle est faite d'une façon ou d'une autre, selon le degré de précision désiré. Bell déplore

[18] Parmi les références classiques récentes sur ce sujet, citons Albert (1992), chapitre 4, Bell (1990), Krips (2008) et Wallace (2008).

[19] Bell (1990), p. 35.

ainsi « le caractère furtif » de cette distinction[20]. Il y a des tentatives de résolution du problème qui n'améliorent pas le flou initial : il en va ainsi des prescriptions selon lesquelles l'appareil de mesure doit être « macroscopique », avoir « un nombre suffisant de degrés de liberté », présenter un comportement « irréversible», être lié à un « observateur », etc. Ces concepts ne sont pas particulièrement mieux définis que celui de « mesure » qui figure dans la formulation orthodoxe de la théorie.

Répétons-le : le problème est d'ordre conceptuel et non pas d'ordre empirique. Il n'y a aucune difficulté pour les physiciens à se servir de la théorie pour en tirer des prédictions. Notamment, ils savent d'expérience comment tracer la limite entre le système quantique et le reste du monde (comprenant l'appareil de mesure) afin d'obtenir la précision requise. La mécanique quantique est parfaitement convenable d'un point de vue pragmatique[21]. Un problème existe seulement lorsqu'on demande que la théorie et son interprétation puissent s'énoncer clairement, de façon cohérente et sans ambiguïté.

Ce problème a été appelé « problème de la mesure » à cause de la formulation qu'il a prise initialement dans le cadre de l'interprétation orthodoxe : il porte sur la définition de ce qu'est une mesure. De façon plus générale, c'est-à-dire en-dehors de l'expression qu'il prend avec l'interprétation orthodoxe, le problème de la mesure consiste à proposer une interprétation satisfaisante de la mécanique quantique (avec, éventuellement, une nouvelle formulation de la théorie), qui soit en accord avec les résultats empiriques[22]. On comprend ainsi que ce soit le problème de la mesure qui soit tenu habituellement pour l'origine de la diversité des interprétations quantiques proposées. En effet, si l'interprétation orthodoxe (ou, dans sa version précédente, l'interprétation de Copenhague) souffre d'un problème conceptuel, il apparaît légitime d'avancer d'autres interprétations de la théorie.

[20]Bell (1987), p. 188.

[21]En anglais, « for all practical purposes ».

[22]Il existe d'autres façons de présenter le problème de la mesure, indépendamment de la formulation orthodoxe de la mécanique quantique que j'ai adoptée ici pour des raisons pédagogiques. Par exemple, on peut commencer par énoncer que l'évolution des systèmes quantiques se fait seulement selon l'équation de Schrödinger et non pas selon le postulat de projection de l'état. On remarque alors que, à partir de superpositions microscopiques, l'équation de Schrödinger prédit par linéarité l'existence de superpositions macroscopiques. Le problème de la mesure consiste alors à rendre compte du fait que ces superpositions macroscopiques ne sont pas observées expérimentalement. Cette présentation est celle qu'adopte Schrödinger dans un article célèbre (Schrödinger, 1935), dans lequel il étend l'indétermination quantique qui concerne un atome radioactif jusqu'à un chat. Le système global se retrouve décrit dans une superposition entre un chat dans un état mort et dans un état vivant. Le problème est qu'une telle description ne semble pas avoir de sens.

1.3 Une interprétation orthodoxe minimale

J'ai reconstruit à la section 1.1 une interprétation orthodoxe contemporaine, dans une version médiane par rapport à différents manuels. J'ai fait alors le choix de ne pas distinguer entre les différentes tendances interprétatives des manuels, car mon objectif dans ce chapitre est seulement de présenter les grandes lignes des interprétations qui comptent dans la recherche actuelle. Il sera néanmoins utile de distinguer une version plus minimale de cette interprétation contemporaine. Il s'agit de celle qui transparaît dans la quasi-totalité des articles scientifiques de mécanique quantique, ou du moins qui est suffisante pour les comprendre. Je nomme cette interprétation l'« interprétation orthodoxe minimale », parce qu'elle est incluse et compatible, en un sens à préciser, avec l'interprétation orthodoxe de la section 1.1 et qu'elle ne pourrait pas contenir moins d'engagements interprétatifs, d'une façon que je préciserai aussi. Le but de cette section est de présenter cette interprétation minimale.

La littérature la présente parfois implicitement, mais sans réellement développer ses caractéristiques. Une définition succincte mais éclairante est donnée par Ismael (2009) :

> « Interprétée de façon minimale, la théorie [de la mécanique quantique] décrit un ensemble de faits à propos de la façon dont le monde microscopique affecte le monde macroscopique, comment cela a un effet sur nos instruments de mesure, décrits dans le langage courant ou dans le langage de la physique classique. »[23]

Cette citation appelle plusieurs remarques. Tout d'abord, il est dit que l'interprétation décrit des faits : on comprend qu'il s'agit des résultats de mesures, pour lesquels la mécanique quantique fournit des prédictions probabilistes. Reconnaître ces résultats de mesures comme des faits est en soit une position interprétative à propos du monde. On verra en effet plus loin, notamment dans la section 3 consacrée à l'interprétation d'Everett, que certaines interprétations ne considèrent pas qu'il existe des faits à propos des résultats de mesures macroscopiques. Aussi, lorsqu'Ismael dit qu'il existe de tels faits, elle se prononce sur ce qui existe dans le monde. Indirectement au moins, elle prend position sur les entités qui composent l'image du monde dans laquelle la théorie est vraie. Ce qu'Ismael définit ici est donc une interprétation au sens de la définition de travail que j'ai proposée au chapitre 1, p. 31. L'interprétation dont parle Ismael ne dit rien de plus sur l'image du monde : elle ne spécifie pas s'il pourrait exister des entités plus fondamentales qui rendraient compte de ces résultats

[23] Ismael (2009), introduction.

de mesures (par exemple, des objets quantiques), ou quelles seraient leurs propriétés. Par exemple, elle ne dit pas si les « systèmes » qui sont considérés dans la théorie sont susceptibles de constituer des entités indépendantes, ou si leur existence dépend entièrement des configurations expérimentales. Cette interprétation est *minimale* au sens où elle n'énonce rien de plus que ce que sont les résultats de mesures, c'est-à-dire ce qui est requis pour que la théorie puisse être confrontée à l'expérience. Il se trouve qu'elle décrit les appareils (et les résultats) de mesure dans le langage classique ; il s'agit là d'un choix similaire à celui de l'interprétation orthodoxe. En ce sens, cette interprétation minimale est compatible avec l'interprétation orthodoxe. Dans l'article d'Ismael, la citation est suivie par une formulation de la mécanique quantique semblable à celle que j'ai exposée à la section 1.1.1 p. 45, ce qui suggère qu'il s'agit de la formulation naturelle de cette interprétation (c'est-à-dire la même que celle de l'interprétation orthodoxe).

Cette interprétation minimale est aussi, semble-t-il, ce que d'autres considèrent comme une interprétation instrumentaliste de la théorie. Dans cet esprit, Wallace présente un « algorithme quantique »[24] que suivent les physiciens pour extraire du contenu empirique à partir du formalisme de la théorie. Cet algorithme est semblable à la formulation orthodoxe de la mécanique quantique que j'ai présentée p. 45[25]. Comme Ismael, l'algorithme quantique suppose l'existence de résultats de mesures à propos desquels la théorie exprime des probabilités. Le terme d'« algorithme » qu'utilise Wallace suggère que la théorie est considérée d'un strict point de vue instrumentaliste, afin que des prédictions expérimentales soient obtenues. Cela confirme l'idée selon laquelle l'interprétation minimale qui y est associée a seulement une fonction instrumentaliste : elle n'a pas pour but d'indiquer d'autres entités ou d'autres propriétés, au-delà de ce qui est utile aux prédictions.

La reconstruction que je propose d'une interprétation (même minimale) autour de cet algorithme quantique ne serait probablement pas acceptée par Wallace. Il semble juger que l'algorithme qu'il présente ne porte pas d'interprétation particulière. Il indique en effet que

> « la 'présentation traditionnelle' de la mécanique quantique [i. e. celle que j'ai faite p. 45] n'est pas une façon de présenter les hypothèses de base de

[24] Cf. Wallace (2008), section 1. D'autres auteurs utilisent cette expression d'« algorithme quantique » et en présentent une version similaire : par exemple Albert (1992), chap. 2, Bricmont (2009), p. 5, Hughes (1989), chap. 6.

[25] À travers cet algorithme, Wallace défend certains raffinements par rapport à la formulation simplifiée que j'ai présentée. Mais cela ne porte pas à conséquence pour la présente discussion. Cf. mes remarques dans la note 10 p. 46.

> la mécanique quantique 'interprétativement neutre' »[26]

Ce faisant, il sous-entend que la présentation plus moderne qu'il fait est, à l'inverse, 'interprétativement neutre'. L'ambiguïté des guillemets autour de cette expression n'étant pas levée plus bas dans le texte de Wallace, je suppose qu'elle doit être prise au sens propre. Aussi, je dois m'inscrire en faux avec sa position : en faisant l'hypothèse de l'existence de résultats de mesures dans le sens du langage commun, l'algorithme suppose un certain engagement interprétatif (fût-il minime). Dans la section 4, je reviendrai sur la question de savoir s'il est même possible que la théorie soit utilisée de façon interprétativement neutre.

Reprenons les caractéristiques de cette interprétation, que j'ai qualifiée de « minimale orthodoxe ». Tout d'abord, elle est reliée à l'interprétation orthodoxe. Comme celle-ci, elle suppose l'existence de faits à propos des résultats de mesures, qui s'expriment dans le langage courant ou de la physique classique. La formulation de la théorie qui lui est naturelle est aussi celle de l'interprétation orthodoxe, présentée p. 45. Les similitudes s'arrêtent là. L'interprétation minimale orthodoxe est débarassée de certaines hypothèses de l'interprétation orthodoxe : elle ne dit rien de la nature déterministe ou indéterministe du monde, ni rien non plus des types d'objets quantiques ou de leurs propriétés. Néanmoins, l'interprétation minimale orthodoxe ne fait pas d'hypothèse supplémentaire qui soit différente de l'interprétation orthodoxe. En ce sens, elle reste compatible avec elle, en en étant seulement une version plus faible. Si le monde est tel que décrit l'interprétation orthodoxe, alors l'interprétation minimale orthodoxe est correcte elle aussi.

Ensuite, cette interprétation est minimale parce que la seule hypothèse qu'elle fait, à savoir l'existence de résultats de mesures à propos desquels la théorie fait des prédictions probabilistes, sert à ce que du contenu empirique puisse être extrait de la théorie[27]. Elle ne dit rien sur ce que pourraient être des objets quantiques qui rendraient compte de ces résultats de mesures, ou sur leurs propriétés : l'image du monde et les entités que propose cette interprétation sont très réduites. Elle ne considère pas que la fonction d'onde représente quelque chose de réel, ou que la projection de cette fonction d'onde correspond à un processus physique. L'interprétation contient seulement ce dont un physicien instrumentaliste peut avoir besoin pour utiliser la théorie.

[26] Wallace (2008), p. 21.

[27] Cela va sans dire (et figure déjà dans la formulation orthodoxe de la théorie, p. 45), mais dans un sens strict l'interprétation minimale suppose aussi : qu'une fonction d'onde est associée à un système, que des observables sont associées à des grandeurs physiques et qu'une probabilité de mesure est associée au module carré de la fonction d'onde. Mais ces hypothèses ne sont qu'instrumentales et n'ont pas vocation à définir les entités qui composent le monde.

Elle semble particulièrement adaptée à des physiciens qui choisiraient une attitude instrumentaliste ou pragmatique[28]. Ces raisons justifient le qualificatif de « minimale ». Il faut aussi le comprendre par rapport à l'interprétation orthodoxe. Supposons qu'on veuille retirer de cette dernière des hypothèses sur ce qui compose l'image du monde, tout en maintenant celles qui sont nécessaires à la prédiction expérimentale. On ne peut malgré tout évacuer celle concernant l'existence de résultats de mesures. On obtient ainsi l'interprétation que j'ai qualifiée d'orthodoxe minimale[29].

Cette section a permis de présenter une variante de l'interprétation orthodoxe, que j'ai qualifiée de minimale. Une autre version de l'interprétation orthodoxe contemporaine mérite d'être étudiée : il s'agit de l'interprétation qui en est historiquement à l'origine et qu'on appelle couramment l'« interprétation de Copenhague ». Elle comporte davantage d'engagements interprétatifs que la version moderne. Je la présente dans la section suivante.

1.4 L'interprétation historique de Copenhague

L'interprétation orthodoxe que j'ai présentée à la section 1.1 a pour ancêtre historique l'interprétation défendue par ce qui a été appelée l'« école de Copenhague ». Ce groupe informel a réuni Bohr, Heisenberg, Born et d'autres physiciens. Ils ne défendaient néanmoins pas tous une interprétation identique de la mécanique quantique : c'est surtout par opposition à ce qu'ils avaient en commun que leurs opposants ont qualifié rétrospectivement leur interprétation comme étant celle de Copenhague[30]. Ici, je vais reconstruire assez succinctement une interprétation proche de celle de Bohr[31].

Selon Bohr, les concepts de la physique classique sont des préconditions à un savoir objectif. C'est-à-dire qu'ils sont nécessaires simplement pour que les physiciens puissent décrir les expériences, leurs résultats ou les phénomènes quantiques. Bohr

[28]Notons qu'on n'est pas condamné à être instrumentaliste en adoptant cette interprétation. On pourrait aussi être réaliste, en reconnaissant seulement pour réalité les résultats de mesures exprimés dans le langage classique.

[29]On pourrait imaginer une autre interprétation, elle aussi minimale par certains aspects, mais qui ne soit pas issue de l'interprétation orthodoxe. Je veux indiquer par là que je ne prétends pas que cette « interprétation orthodoxe minimale » soit la seule qui contienne un minimum d'engagements interprétatifs.

[30]Cf. par exemple Howard (2004), qui discute également du rôle de Heisenberg dans la présentation des idées de Bohr.

[31]Je m'appuie notamment sur Beller (1999), Faye (2008), Howard (2004), Krips (2008) ; cf. également les références qu'ils indiquent. Parmi les manuels dans l'esprit de Copenhague, on peut citer Landau et Lifchitz (1975), très proche de Bohr — Bell (1990, p. 34) donne l'image d'un Landau assis aux pieds de Bohr — ou Peres (1993), qui se revendique aussi de Bohr et développe une position opérationnaliste.

estime que ces concepts classiques (par exemple ceux de position, de temps, de cause) sont le raffinement des catégories du langage commun. Bohr adopte ainsi une position proche du courant néo-kantien : les concepts spatio-temporels et causaux classiques sont requis pour une description objective ; les actes d'observation et de mesure sont constitutifs des phénomènes. Bohr ne propose donc pas que les concepts de la physique classique soient remplacés par des concepts quantiques. Il fait des premiers des étapes indispensables dans l'utilisation d'une théorie quantique.

Selon Bohr, la nouveauté essentielle apportée par la mécanique quantique est que les concepts classiques ne sont pas tous applicables en même temps. Bohr développe alors un concept qui est central à son interprétation de la mécanique quantique, celui de *complémentarité*. Il l'applique initialement à des descriptions de systèmes et change ultérieurement pour parler de phénomènes complémentaires. La complémentarité de propriétés signifie que leur attribution repose sur des expériences qui sont mutuellement exclusives. Essentiellement, ce sont les propriétés cinématiques qui sont complémentaires des propriétés dynamiques (Bohr abandonne progressivement l'idée de la complémentarité onde-particule). Par exemple, la position d'un électron est complémentaire de son impulsion. En effet, mesurer la position ou l'impulsion suppose des arrangements expérimentaux différents, qui ne peuvent pas être mis en œuvre simultanément. D'un point de vue formel, des variables complémentaires sont conjuguées et elles vérifient une inégalité de Heisenberg[32].

Pour Bohr, les propriétés d'un système dépendent de manière fondamentale des conditions expérimentales, y compris des conditions de mesure. Elles ne sont correctement définies que si l'arrangement expérimental complet est précisé. La définition d'un phénomène requiert d'ailleurs une description complète de l'expérience. Ainsi, on ne peut pas parler de la position d'un système quantique de façon générale. On ne peut le faire que si on spécifie le dispositif expérimental qui permet de mesurer cette position. De façon similaire, Bohr refuse d'attribuer de propriété si elle n'est pas observée dans une expérience. Aussi, pour Bohr, les conditions de vérités des phrases qui attribuent une certaine propriété à un système quantique dépendent de l'appareil mis en jeu : elles doivent inclure la référence au dispositif expérimental et au résultat de l'expérience. Comme ce sont toujours des concepts classiques qui doivent être employés (bien que de façon complémentaire), Bohr va jusqu'à considérer qu'il n'existe pas d'entités proprement quantiques ou de concepts quantiques.

[32] On dit que des variables a et b sont conjuguées si elles vérifient $b = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{a}}$, où $\mathcal{L}$ est le lagrangien. Par exemple, la position x et l'impulsion p sont conjuguées. L'inégalité de Heisenberg qu'elles vérifient est $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$, où Δx et Δp sont respectivement les écarts-types de x et p.

J'ai indiqué jusqu'à présent l'interprétation défendue par Bohr. De son côté, Heisenberg défend une lecture davantage positiviste de la théorie. Il considère par exemple que « la physique doit se limiter à la description des relations entre les perceptions. »[33] et ne pas s'occuper de spéculations métaphysiques. Son interprétation de la mécanique quantique donne aussi davantage de place à l'observateur. Selon lui, c'est l'observation qui crée le fait que les propriétés du système quantique deviennent définies. Il parle de la projection de la fonction d'onde comme étant induite par l'observateur. La mécanique quantique représente moins la réalité que la connaissance que nous en avons.

Comparons l'interprétation historique de Copenhague (du moins, celle de Bohr), avec l'interprétation contemporaine orthodoxe, que j'ai présentée à la section 1.1. D'un point de vue global, l'interprétation de Bohr contient davantage d'engagements interprétatifs et des thèses métaphysiques, en énonçant certaines impossibilités. Par exemple, la position de Bohr contient la thèse forte de l'indispensabilité des concepts classiques et l'impossibilité des concepts quantiques. Elle suppose aussi que la définition d'une propriété suppose la spécification de tout le dispositif expérimental. L'interprétation orthodoxe affirme seulement que l'existence d'une propriété suppose que l'état du système soit un vecteur propre de l'observable correspondante : c'est le cas juste après une mesure, mais ça peut être aussi le cas en-dehors d'un dispositif expérimental. Bohr insiste sur la complémentarité des concepts classiques de façon plus appuyée que l'interprétation orthodoxe, pour laquelle elle prend surtout la forme de l'inégalité de Heisenberg pour des variables conjuguées. Contrairement à l'interprétation orthodoxe, Bohr ne dit pas que l'appareil de mesure perturbe le système quantique. Sa position consiste en effet à considérer que le système quantique n'est pas un objet classique ayant des propriétés définies préalablement, susceptibles d'être perturbées. Bohr ne parle jamais de la réduction de la fonction d'onde comme d'un phénomène physique résultant d'une interaction. Selon lui, la fonction d'onde ne réfère à rien physiquement et elle n'est qu'un outil de calcul. L'interprétation orthodoxe rejoint néanmoins Bohr sur un certain nombre de points. L'indéterminisme des résultats de mesures est pris comme une donnée fondamentale. Tous deux reconnaissent l'existence d'une interaction incontrôlable entre l'appareil et le système quantique.

Pour conclure sur l'interprétation historique de Copenhague, je voudrais aborder une possible objection : l'interprétation de Bohr est-elle véritablement une interprétation au sens d'une image d'un monde ? Bohr va en effet jusqu'à dire parfois qu'il

[33] Heisenberg, cité par Krips (2008), section 1.

n'existe pas d'entités quantiques ou de concepts quantiques[34]. Il estime aussi que le formalisme de la mécanique quantique ne peut donner une représentation littérale du monde quantique[35]. L'interprétation de Bohr serait plutôt l'expression du refus de proposer une image quantique du monde. Une telle objection pourrait mettre en péril la définition de travail de l'interprétation que j'ai proposée au chapitre 1, section 2.4. Selon elle, interpréter une théorie revient à proposer une image du monde dans laquelle la théorie est vraie, c'est-à-dire caractériser les entités dont se compose le monde et à préciser quelles sont leurs propriétés. N'est-ce pas ce que se refuse à faire Bohr ? Je vais montrer que l'approche de Bohr est au contraire compatible avec cette définition. Selon la notion d'interprétation que j'ai proposée, il ne s'agit en aucun cas de prendre le terme d'« image » au sens littéral. Je ne dis pas qu'interpréter une théorie, c'est proposer un dessin illustré, représentant dans un espace à trois dimensions des objets en couleur. Si c'est cela que Bohr se refuse à faire, il n'y a là aucun problème. Selon ma proposition, interpréter une théorie revient à spécifier les types d'entités et de propriétés du monde. « Spécifier » peut être fait par la négative : on fixe des contraintes ou des interdictions sur les entités ou les propriétés susceptibles de composer le monde. En ce sens, ce que Bohr propose est une interprétation : en disant que la fonction d'onde ne représente rien, il dit aussi que les entités sont les systèmes quantiques (électrons, atomes...) ; en affirmant l'inexistence de propriétés objectives, il indique aussi que l'attribution de propriétés doit inclure la donnée de la configuration expérimentale[36]. Ce faisant, Bohr fixe une contrainte sur les types d'objets et de propriétés acceptables. Il s'inscrit dans la caractérisation de l'interprétation de la théorie que j'ai donnée et on peut dire que Bohr précise l'image du monde possible selon la théorie. Toutes les versions de l'interprétation orthodoxe sont donc compatibles avec la définition de travail de l'interprétation d'une théorie physique que j'ai proposée.

1.5 Conclusion

J'ai présenté dans cette section l'interprétation orthodoxe contemporaine qu'on trouve dans les manuels (sections 1.1.1 et 1.1.2) : elle repose sur le concept d'état du système, évoluant suivant l'équation de Schrödinger en-dehors d'une mesure et étant

[34]Beller (1999), p. 197.

[35]Faye (2008), section 4.

[36]Cette analyse est partagée par Faye (2008), section 4, qui indique notamment que le concept de complémentarité bohrien « est porteur d'implications ontologiques », c'est-à-dire qu'il revient à prendre position sur les entités qui composent le monde.

réduit lors d'une mesure. Elle suppose une distinction entre un domaine classique et un domaine quantique. L'image du monde orthodoxe est indéterministe et les propriétés des systèmes quantiques ne sont pas toujours définies. À cette occasion, j'ai introduit l'idée d'une formulation de la théorie naturellement associée à une interprétation (section 1.1.3), celle dans laquelle les concepts de l'interprétation s'expriment facilement. J'ai ensuite distingué deux versions de l'interprétation orthodoxe. La première est l'interprétation orthodoxe minimale, pour laquelle les entités du monde sont seulement les résultats de mesures. Elle suffit pour que la théorie puisse être appliquée expérimentalement. La seconde est l'interprétation dite « de Copenhague », défendue notamment par Bohr. Elle insiste sur l'indispensabilité des concepts classiques. Son concept central est la complémentarité, selon lequel l'attribution de certaines propriétés cinématiques et dynamiques repose sur des expériences mutuellement exclusives. Enfin, la définition d'une propriété suppose que soit précisé le dispositif expérimental complet.

Dans certains cas, la distinction entre l'interprétation orthodoxe et ses versions minimale ou de Copenhague peut être délicate à effectuer. Je n'ai indiqué ici que des tendances générales qui peuvent servir de guides. On peut hiérarchiser ces versions selon leur degré de prescriptions interprétatives : tout d'abord, l'interprétation minimale ne suppose rien sur les objets quantiques et se contente d'une description des événements dans les termes du langage classique. Ensuite, l'interprétation orthodoxe prend position sur l'existence d'objets quantiques et sur les conditions de leurs propriétés. Enfin, l'interprétation de Copenhague repose sur des présupposés plus conséquents, tels que l'indispensabilité des concepts classiques ou la nécessité de spécifier l'ensemble du contexte expérimental pour pouvoir définir une propriété.

2 L'interprétation de Bohm

Parmi les interprétations alternatives à l'interprétation orthodoxe de la mécanique quantique, celle de de Broglie-Bohm est peut-être la plus ancienne qui continue d'être considérée favorablement aujourd'hui. Elle a été proposée par Louis de Broglie en 1927, sous la forme d'une « théorie de l'onde-pilote », puis redécouverte indépendamment en 1952 par David Bohm, qui en a développé les bases mathématiques. Cette section présente ce qu'on appelle aussi la « mécanique bohmienne » (« Bohmian Mechanics »)[37]. Je ne présenterai ici aussi qu'une interprétation médiane par rapport à

[37]Je m'appuie notamment sur Albert (1992), chapitre 7, Bohm (1952), Dürr et Teufeul (2009), Goldstein (2006) et Wallace (2008), section 6.

toutes celles qui sont discutées au sein de la mécanique bohmienne[38]. Je commence par une présentation générale (section 2.1), avant d'exposer la formulation de la mécanique bohmienne (section 2.2) ; je récapitule ensuite l'image bohmienne du monde (section 2.3).

2.1 Présentation générale

Dans la mécanique quantique orthodoxe (cf. section 1.1), les prédictions probabilistes sont interprétées de façon objective, comme reflétant un indéterminisme fondamental. L'interprétation orthodoxe affirme que la fonction d'onde fournit une description complète des systèmes quantiques et qu'il n'existe pas de « variable cachée » supplémentaire qui déterminerait les résultats de mesures plus précisément que ne le font les prédictions probabilistes. Une telle interprétation a longtemps rencontré des résistances. Ne peut-on pas compléter la donnée de la fonction d'onde par d'autres variables, qui détermineraient le résultat des mesures ? Les probabilités quantiques seraient ainsi seulement le reflet d'une ignorance vis-à-vis du détail de ces variables additionnelles.

L'interprétation de Bohm peut être considérée comme le résultat d'une tentative de compléter la mécanique quantique orthodoxe. En plus de la donnée de la fonction d'onde, elle décrit un système quantique avec des « variables cachées », en l'occurrence les positions des particules. Celles-ci ont toujours une valeur précise à chaque instant et elles déterminent le résultat d'une mesure. La mécanique bohmienne est ainsi déterministe et les probabilités des prédictions théoriques ne sont que le reflet d'une ignorance subjective vis-à-vis de ces variables cachées. Néanmoins, l'arrangement théorique de ces variables cachées est tel que les prédictions de la mécanique bohmienne sont exactement les mêmes que celles de la mécanique quantique orthodoxe : il n'est pas possible de les exploiter pour parvenir à des prédictions plus précises.

Reprenons par exemple le cas de l'électron dont l'état de spin selon z est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$. L'interprétation bohmienne introduit la donnée de la position Q de la particule. Selon la position initiale de Q par rapport à l'instrument de mesure, les équations de la mécanique bohmienne permettent de dire, de façon déterministe, que l'électron terminera dans l'état $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$. Néanmoins, comme la mécanique bohmienne ne prétend pas connaître Q mais seulement la distribution de probabilité de Q, elle donne que des prédictions probabilistes.

[38] Pour une présentation des divers raffinement interprétatifs ou de leurs problèmes conceptuels, je renvoie à Belousek (2003) et Wallace (2008), section 6 et aux références qu'ils indiquent.

2.2 Formulation de la mécanique bohmienne

La formulation naturelle de la mécanique bohmienne — naturelle, au sens de la section 1.1.3) — est différente de celle de la mécanique quantique orthodoxe, notamment à cause des variables supplémentaires qui sont introduites. Elle peut s'énoncer de la façon suivante[39] :

1. Un système de N particules est décrit par deux quantités : une fonction d'onde ψ d'un espace de Hilbert et les positions $\{Q_k(t)\}_{k=1,\ldots,N}$ des N particules.

2. La fonction d'onde ψ évolue selon l'équation de Schrödinger.

3. Les positions des particules évoluent selon l'équation pilote

$$\frac{\mathrm{d}Q_k(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{\hbar}{m}\mathrm{Im}\left[\frac{\psi^*\partial_k\psi}{\psi^*\psi}\right](Q_1, ..., Q_N) \tag{2.2}$$

4. La densité initiale de particules en x est proportionnelle à $|\psi(x)|^2$ (c'est le postulat de l'équilibre quantique).

Faisons quelques commentaires sur ces postulats. Dans la formulation de la mécanique bohmienne, on retrouve tout d'abord la fonction d'onde ψ. Elle évolue *toujours* selon l'équation de Schrödinger et n'est pas sujette à un postulat de réduction. Il est cependant possible de montrer que la fonction d'onde connaît, lors d'une interaction avec un instrument de mesure, une réduction *effective*[40]. La fonction d'onde bohmienne (conditionnelle) d'un système évolue finalement de la même façon que celle de la mécanique quantique orthodoxe.

La mécanique bohmienne introduit, en plus de la fonction d'onde, les variables supplémentaires que sont les positions des particules $Q_k(t)$: ce sont les fameuses « variables cachées »[41]. Ces variables sont définies quel que soit le temps t : les particules bohmiennes ont une position à chaque instant et donc une trajectoire. L'évolution des positions des particules se fait selon le troisième postulat : on remarque qu'elle dépend seulement de la valeur de la fonction d'onde (à l'endroit où sont les particules). En

[39] Une autre formulation de la mécanique bohmienne s'appuie sur le concept de potentiel bohmien. Cf. par exemple Goldstein (2006), section 5.

[40] Cela est dû notamment au fait suivant : la fonction d'onde qu'il faut considérer s'applique au système composé à la fois des particules étudiées et de l'appareil de mesure. Les particules sont alors décrites par une fonction d'onde conditionnelle, en tant que sous-système du système global. On montre que cette fonction d'onde conditionnelle a des propriétés particulières, notamment celle de subir une réduction effective. Cf. par exemple Albert (1992), p. 157-158.

[41] Pour une critique de ce terme, cf. par exemple Bell (1987), p. 201-202.

d'autres termes, c'est la fonction d'onde et elle seule qui guide l'évolution des particules, d'où le terme d'onde-pilote. Le membre de droite de l'équation 2.2 n'est autre, à un facteur de proportionnalité prêt, que le courant (ou flux) de probabilité de la mécanique quantique orthodoxe, divisé par la densité de probabilité ρ. Cette équation dit simplement que la vitesse des particules est colinéaire au flux de probabilité, donc qu'elles suivent les courants de probabilité. Si la fonction d'onde influe sur la position des particules, l'inverse n'est pas vrai, car la fonction d'onde évolue seulement selon l'équation de Schrödinger. On note que l'équation régissant la dynamique des particules est du premier ordre : les conditions initiales ont seulement besoin de concerner la position des particules (à la différence de la mécanique classique, où les équations sont du second ordre et où les impulsions initiales sont requises).

C'est ce qu'indique le dernier postulat : il précise la distribution initiale des particules. Celle-ci doit se faire de façon proportionnelle au module carré de la fonction d'onde initiale. Pour cette raison, la règle de Born, indiquant que la probabilité de mesurer une particule en x est proportionnelle au module carré de ψ, est vérifiée à l'instant initial. En vertu du fait que les particules suivent à chaque instant les courants de probabilité (équation 2.2), on montre que cette propriété est encore vérifiée à chaque instant ultérieur[42]. Dès lors, la probabilité de trouver une particule en x est donnée par la règle de Born à chaque instant et on en déduit que la mécanique bohmienne donne des prédictions identiques à celles de la mécanique quantique orthodoxe[43].

Comme la mécanique bohmienne donne des positions aux particules à chaque instant, on peut se demander si on ne pourrait pas mettre en place des mesures astucieuses pour déterminer ces positions — auquel cas on s'affranchirait des prédictions seulement probabilistes et on serait plus précis que la mécanique quantique orthodoxe. Cela n'est pas possible : on montre qu'il existe une limite de principe à la statistique qu'il est possible de connaître[44]. La dynamique des particules est telle qu'elles échappent toujours aux tentatives de mesures de leurs positions plus précises.

2.3 L'image bohmienne du monde

L'image bohmienne du monde est radicalement différente de l'image orthodoxe. Elle s'appuie sur deux types d'entités : d'une part la fonction d'onde, d'autre part les particules. La fonction d'onde, tout d'abord, est considérée comme une entité

[42]Cf. Dürr, Goldstein et Zanghì (1992).
[43]La question de l'équivalence des prédictions sera approfondie dans la section 4.
[44]Cf. Dürr, Goldstein et Zanghì (1992), section 5. Ils parlent d'« incertitude absolue ».

authentiquement physique,

> « tout aussi 'réelle' et 'objective' que, par exemple, les champs électromagnétiques de Maxwell »[45]

Elle n'est pas simplement une représentation mathématique utile dans des calculs, comme en mécanique quantique orthodoxe. Les propriétés de la fonction d'onde, en mécanique bohmienne, consistent en son amplitude en chaque point de l'espace. Contrairement à l'image orthodoxe, le fait qu'elle ne soit pas un vecteur propre d'un certain opérateur ne signifie pas qu'une grandeur physique soit mal définie. Les particules constituent la seconde sorte d'objets que la mécanique bohmienne considère. Chaque particule matérielle a toujours une position précise. En mécanique bohmienne, toutes les autres propriétés mesurables — spin, impulsion, énergie... — peuvent s'exprimer au moyen de la position de particules, car leur mesure se ramène toujours *in fine* à la détermination de positions : position d'une aiguille d'un instrument, position d'un atome en sortie d'un appareil de Stern-Gerlach (mesurant le spin), etc. Selon l'interprétation bohmienne, il existe des faits tout d'abord à propos des positions des particules et par conséquent à propos des résultats de mesures d'observables quelconques.

Dans la mécanique bohmienne, les résultats des mesures sont contextualistes : selon qu'une grandeur physique est mesurée dans un contexte expérimental ou dans un autre, le résultat de la mesure peut être différent. Considérons par exemple la mesure du spin d'un électron donné au moyen d'un appareil de Stern-Gerlach[46]. Cela consiste à envoyer un électron dans un espace où règne un champ magnétique orienté, par exemple vers le haut ; selon la déviation de l'électron (vers le haut ou vers le bas) on en déduit son spin, $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$. À partir des équations bohmiennes du mouvement des particules, on montre que le fait que l'électron sorte de cet appareil dévié vers le haut ou vers le bas ne dépend que de sa position initiale exacte (bohmienne) et pas de l'orientation du champ magnétique, c'est-à-dire de l'orientation de l'appareil de Stern-Gerlach. La conséquence est la suivante : si on oriente l'appareil de Stern-Gerlach vers le haut, le résultat de la mesure du spin de l'électron sera $|\uparrow\rangle$ et si on l'oriente vers le bas, le résultat sera $|\downarrow\rangle$. En mécanique bohmienne, la mesure du spin donne un résultat qui est déterminé à l'avance (il n'est pas « indéterminé » ou « indéfini »), mais qui dépend du contexte exact de l'expérience menée pour le mesurer.

Une autre caractéristique de l'image bohmienne du monde est qu'elle est non-locale (de même que l'image orthodoxe). D'après l'équation 2.2, le mouvement d'une

[45] Bell (1987), p. 128.
[46] Cf. Albert (1992), p. 145-147.

particule à partir de sa position en un point x_k, est gouverné par la valeur de la fonction d'onde. Or celle-ci ne dépend pas seulement de la position x_k de la particule en question, mais aussi des positions des autres particules (c'est la dépendance envers l'ensemble des Q_k, dans le membre de droite de l'équation) : c'est ainsi que les autres particules, quelles que soient leurs distances vis-à-vis de la première particule, peuvent influer sur son mouvement. La mécanique bohmienne met simplement en évidence de façon explicite l'origine de la non-localité.

L'image bohmienne du monde est déterministe : la fonction d'onde évolue selon une équation différentielle, sans jamais subir de saut ou de projection aléatoire ; les particules ont une position déterminée par la fonction d'onde et leurs trajectoires sont déterministes. En revanche, le monde bohmien nous *apparaît* indéterministe, car nous n'avons pas accès à l'ensemble des positions des particules. C'est par ignorance que nous formulons des prédictions probabilistes : les probabilités bohmiennes reçoivent une interprétation épistémique.

Cette situation est donc très semblable à celle qui existe en mécanique statistique : des configurations précises existent pour les particules, mais la théorie ne prédit que des moyennes, sans chercher à connaître quelles sont ces configurations (en l'occurrence, des positions). Il existe cependant des différences : en mécanique statistique, il est possible en principe de connaître les configurations individuelles ; en mécanique bohmienne, il est au contraire impossible d'avoir accès à une meilleure information que celle fournie par la fonction d'onde, avec des moyennes probabilistes. Autre différence, les particules bohmiennes sont soumises non pas à des forces entre elles, mais obéissent à une loi qui met en jeu seulement la fonction d'onde (l'équation 2.2).

Revenons un instant sur l'affirmation de l'interprétation orthodoxe, selon laquelle la fonction d'onde fournit une description complète des systèmes quantiques. En quel sens peut-on dire que l'interprétation bohmienne s'y oppose et est davantage complète ? La mécanique bohmienne ajoute la spécification des positions des particules à chaque instant. L'image du monde qu'elle propose contient donc davantage que la seule fonction d'onde. Mais ces nouvelles variables ne sont pas déterminables par des mesures, quelles qu'elles soient et elles n'apportent pas de différence observable. Ainsi, la mécanique bohmienne ne complète la mécanique quantique orthodoxe que d'un point de vue de l'image du monde[47], mais certainement pas d'un point de vue prédictif ou instrumentaliste. Les probabilités y sont interprétées épistémiquement,

[47] Cependant, à strictement parler, l'interprétation orthodoxe ne considère pas la fonction d'onde comme étant une entité du monde. La mécanique bohmienne ne vient donc pas simplement *ajouter* des particules à la fonction d'onde, mais elle modifie l'image du monde dans son ensemble.

mais elles ne peuvent pas être dépassées par des prédictions plus précises.

3 L'interprétation des mondes multiples d'Everett

Une autre interprétation de la mécanique quantique a les faveurs de nombreux physiciens et philosophes des sciences. Il s'agit de l'interprétation qu'Everett a proposée en 1957, dans la version popularisée par DeWitt (1970), et qui est aussi appelée l'interprétation des mondes multiples (les deux dénominations sont prises ici pour synonymes). Dans cette section, je présente cette interprétation quantique[48] ; comme je l'ai fait pour les autres interprétations, je reconstruis ici seulement une version médiane de l'interprétation par rapport à toutes ses versions et je ne développe pas les problèmes conceptuels auxquels elle fait face. Je commence par présenter la formulation de la théorie quantique selon l'interprétation des mondes multiples (section 3.1) avant de synthétiser l'image du monde qu'elle propose (section 3.2).

3.1 Formulation de la théorie

Le problème de la mesure que j'ai présenté à la section 1.2 réside dans le fait qu'il existe deux lois d'évolution pour la fonction d'onde — l'équation de Schrödinger et la réduction de la fonction d'onde — sans que rien ne définisse les circonstances dans lesquelles l'une ou l'autre s'applique. L'interprétation des mondes multiples propose la solution suivante : elle supprime le postulat de projection de la fonction d'onde et elle ne garde que l'évolution selon l'équation de Schrödinger. Celle-ci est la seule et vraie équation du mouvement, à laquelle obéit le monde dans son ensemble. Il n'y a plus d'ambiguïté dans l'application du postulat de réduction, ni dans la définition de ce qu'est une « mesure ».

Ne retombe-t-on pas dans une autre version du problème de la mesure[49] ? Si la fonction d'onde du monde ne subit pas de réduction, elle est inévitablement et rapidement dans un état superposé. Notamment, lorsqu'une particule dans un état superposé interagit avec un appareil de mesure, ce dernier termine lui aussi dans un état superposé. Considérons par exemple une machine de Stern-Gerlach, capable de réaliser une mesure idéale du spin des particules : si un électron dont l'état est $|\uparrow\rangle_e$ entre dans cette machine, elle passe de l'état $|\text{prêt}\rangle_m$ à $|\text{« } \uparrow \text{ »}\rangle_m$, indiquant qu'elle a

[48] Pour cela, je m'appuie ici notamment sur Albert (1992) chapitre 6, Barret (2011), Vaidman (2008), Wallace (2008), section 4.

[49] Celle indiquée à la note 22 p. 53.

mesuré un spin vers le haut. Pour l'ensemble {machine + électron}, l'opération de mesure consiste en la transformation suivante :

$$|\text{prêt}\rangle_m|\uparrow\rangle_e \quad \longmapsto \quad |\text{« }\uparrow\text{ »}\rangle_m|\uparrow\rangle_e \tag{2.3}$$

De même, on aura

$$|\text{prêt}\rangle_m|\downarrow\rangle_e \quad \longmapsto \quad |\text{« }\downarrow\text{ »}\rangle_m|\downarrow\rangle_e \tag{2.4}$$

Considérons maintenant un électron dont l'état est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_e + |\downarrow\rangle_e)$. Comme la machine obéit à l'équation de Schrödinger qui est linéaire, on obtient à partir des deux équations précédentes le résultat :

$$|\text{prêt}\rangle_m \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_e + |\downarrow\rangle_e) \quad \longmapsto \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{« }\uparrow\text{ »}\rangle_m|\uparrow\rangle_e + |\text{« }\downarrow\text{ »}\rangle_m|\downarrow\rangle_e) \tag{2.5}$$

Selon une lecture courante (orthodoxe), ce dernier état signifie qu'il n'existe aucun fait à propos du spin de l'électron, ni aucun fait à propos du résultat qu'indique la machine. Cela semble en contradiction flagrante avec le constat que font les physiciens au laboratoire : ils observent effectivement l'un des deux résultats. Ce problème vient du fait que l'interprétation d'Everett a supprimé le postulat de projection qui permettait de ne retenir que l'un des deux résultats. Ainsi, en évacuant le problématique postulat de projection de la fonction d'onde reposant sur une notion vague de « mesure », il semble qu'on ait du même coup retiré la simple possibilité qu'il y ait des résultats de mesures à prédire. Comment l'interprétation des mondes multiples s'en sort-elle ?

Sa solution consiste à abandonner, en plus du postulat de projection, la lecture orthodoxe concernant la superposition des états. Le terme de droite de l'équation 2.5 doit être interprété non pas comme une superposition d'états différents d'un même système, ici composé d'une machine et d'un électron, mais comme une certaine *multiplicité* de machines et d'électrons. Chaque terme de la superposition mathématique correspond à des mondes différents : dans l'un d'eux, le spin de l'électron est vers le haut et la machine l'a mesuré vers le haut ; dans l'autre, il est vers le bas et la machine l'a mesuré vers le bas. Si un physicien venait observer le système, on obtiendrait pour l'ensemble :

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{croit que }\uparrow\rangle_p|\text{« }\uparrow\text{ »}\rangle_m|\uparrow\rangle_e + |\text{croit que }\downarrow\rangle_p|\text{« }\downarrow\text{ »}\rangle_m|\downarrow\rangle_e) \tag{2.6}$$

Après la mesure, il y aurait deux physiciens, vivant dans des mondes différents, vi-

sualisant chacun des résultats différents. Tous les deux sont aussi « réels » l'un que l'autre et il n'y en a pas un plus vrai que l'autre. Tous deux ont la même filiation à leur ancêtre, c'est-à-dire qu'ils sont dans des rôles symétriques vis-à-vis du physicien avant qu'il n'interagisse avec le système. L'interprétation d'Everett définit donc ici deux mondes pour rendre compte des deux termes de la somme. Pour désigner l'ensemble de ces deux mondes, je parlerai de l'« univers »[50].

Il est important de noter que, si l'on se restreint à l'un des deux mondes (mathématiquement, si l'on considère l'un des deux termes de la somme), l'état de la machine et celui de l'électron permettent d'affirmer qu'il existe un résultat de mesure bien défini, qu'un observateur peut constater. Seulement, ces résultats sont différents entre les deux mondes. Cela conduit à définir les états (ou les faits) *relativement* à un observateur — d'où le nom qu'a donné Everett de « formulation de l'état relatif ». L'interprétation des mondes multiples abandonne donc le lien entre le fait pour la fonction d'onde d'être un vecteur propre d'un opérateur et l'existence d'une propriété : elle relativise cette existence au monde en question[51]. C'est ainsi que l'interprétation des mondes multiples parvient à expliquer pourquoi des résultats (macroscopiques) peuvent être observés, en dépit de l'absence de projection de la fonction d'onde sur l'un ou l'autre des vecteurs propres de l'observable[52].

Selon l'interprétation des mondes multiples, tous les résultats possibles d'une mesure sont toujours obtenus, chacun dans un monde. Ainsi, il n'y a pas lieu de poser la question : « quelle est la probabilité que tel résultat soit obtenu ? ». La règle de Born, qui dit que la probabilité d'obtenir un résultat est donné par le module carré de la fonction d'onde projetée sur l'état propre correspondant (le postulat 3 de la formulation orthodoxe), ne fait pas partie de la formulation everettienne de la mécanique quantique. C'est seulement pour un observateur que les probabilités peuvent intervenir, puisque dans le monde particulier dans lequel il est, tous les résultats ne se réalisent pas.

Selon les développements récents de l'interprétation des mondes multiples, les probabilités concernent les *paris* que peut accepter un agent, concernant les événements

[50]La terminologie à ce sujet n'est pas consensuelle. Certains parlent d'« univers » pour ce que j'appelle « monde » et de « multivers », pour ce que j'appelle « univers ».

[51]Notons que l'interprétation des mondes multiples reconnaît, comme l'interprétation orthodoxe, qu'il n'y a pas de fait à propos du résultat de la mesure du spin, pour le monde dans son ensemble.

[52]Cette présentation passe sous silence un problème auquel a dû faire face l'interprétation, celui dit de la « base préférée ». Les mondes everettiens ont été définis ici à partir des différentes composantes mathématiques de la fonction d'onde. Or celle-ci peut être réécrite en étant décomposée sur une autre base mathématique. Laquelle des bases et laquelle des écritures peut être considérée comme légitime pour définir les mondes everettiens ? Selon Wallace (2008) section 4.4, il existe aujourd'hui un consensus pour considérer que la base est sélectionnée par le processus de décohérence.

futurs d'une expérience. Même s'il sait que tous les résultats seront observés par un de ses descendants (dans un des mondes), il peut parier comme si un événement de hasard allait survenir. Pour cela, il parie en fonction de ce dont il se soucie dans les mondes futurs. En introduisant une certaine mesure d'un tel soucis, on montre qu'un agent rationnel devrait se comporter, dans ses paris, selon les probabilités données par la règle de Born — c'est-à-dire, que le module carré de ψ joue le même rôle formel dans ses délibérations que des probabilités dans un univers indéterministe[53]. C'est donc avec des arguments de la théorie de la décision que les probabilités sont introduites dans un univers déterministe. Ce faisant, l'objet des prédictions de la mécanique quantique concerne, selon l'interprétation d'Everett, non pas les résultats de mesures qui se produisent toujours, mais les paris que font les agents rationnels sur des événements futurs — et qui, selon l'argument, doivent être les mêmes dans tous les mondes.

Pour formuler le contenu de la mécanique quantique, l'interprétation d'Everett utilise le même formalisme mathématique que la mécanique quantique orthodoxe (à l'inverse de la mécanique bohmienne, elle n'ajoute pas de variables supplémentaires). Elle supprime cependant le postulat de la projection de la fonction d'onde et celui donnant la probabilité d'une mesure (postulats 3 et 4). L'interprétation d'Everett est ainsi assez minimale — elle est parfois appelé « pure interprétation » de la théorie quantique, parce qu'elle n'ajoute pas de nouveau matériau mathématique.

3.2 L'image everettienne du monde

Reprenons à présent les caractéristiques de l'image du monde dans lequel la mécanique quantique serait vraie selon Everett (ou plutôt, les caractéristiques de l'image de l'*univers*, puisque pour l'interprétation d'Everett, je désigne par « univers » l'ensemble des mondes qui correspondent chacun aux différentes composantes de la fonction d'onde[54]). La fonction d'onde (de tout l'univers) est l'entité fondamentale : l'objet mathématique $|\psi\rangle$ est interprété comme une entité physique putative. C'est l'univers lui-même, en tant qu'il est une fonction d'onde, qui évolue selon l'équation de

[53]Cette démonstration est controversée, cf. Wallace (2008), section 4.6 pour une bibliographie, ainsi qu'Albert (2007). Je ne prétends pas ici donner un assentiment à une telle position ; il semble qu'elle soit actuellement une des meilleures disponibles pour l'interprétation des mondes multiples. Mon objectif dans ces sections est seulement de présenter la meilleure version médiane de chacune des interprétations.

[54]Néanmoins, tous les mondes everettiens sont composés des mêmes types d'entités et de propriétés. Aussi, il n'y a pas d'ambiguïté à parler de l'« image *du* monde », pour y référer de manière générique aux différents mondes. J'utiliserai donc parfois l'expression « image everettienne du monde », pour rester fidèle à la terminologie du chapitre 1 et des autres interprétations du présent chapitre.

Schrödinger. L'univers se décompose en des mondes — en vérité, un nombre extraordinairement grand de mondes, toujours dans un processus d'embranchements, multipliant à chaque instant le nombre de mondes. Les entités everettiennes se composent donc d'une myriade de mondes. Ces mondes sont d'apparence classique et se composent d'objets (macroscopiques) qui sont dans des états définis. Ils sont quasi-indépendants[55]. Les autres mondes sont donc inobservables depuis un monde particulier, ce qui explique pourquoi nous avons l'impression qu'il n'existe toujours qu'un seul monde.

L'univers everettien est déterministe. En effet, la fonction d'onde de l'univers obéit à l'équation de Schrödinger, qui est une équation déterministe. Tous les résultats de mesures possible (ou d'interaction) se produiront toujours ; l'avenir n'est pas incertain. En revanche, les agents des différents mondes ont des expériences psychologiques différentes. Le cours du monde peut leur apparaître indéterministe, dans la mesure où ils n'ont accès à qu'un seul monde. Les probabilités entrent en jeu par le biais des paris que les agents peuvent accepter. Elles expriment alors des contraintes pour tous les agents rationnels. En ce sens, il s'agit de probabilités objectives, contrairement aux apparences[56].

Dans l'interprétation des mondes multiples, l'objet des prédictions de la théorie ne peut être les résultats des mesures, puisque tous se réalisent dans un monde. Les prédictions de la théorie concernent les paris que font les agents rationnels. Ces paris doivent être faits comme si les agents suivaient les probabilités données par la loi de Born. Notons que, de façon générale, l'interprétation d'Everett ne reconnaît pas de fait pour l'univers dans son ensemble. Lorsqu'il existe des faits à propos des objets macroscopiques, c'est seulement de façon relative à un monde, ou à un observateur. C'est seulement par abus de langage qu'on parle alors du résultat d'une mesure, en oubliant de spécifier que cela est le cas relativement à notre monde.

Une autre caractéristique de l'image de l'univers everettien est qu'il est *local*. Il n'existe aucune sorte d'interaction à distance ; l'évolution de la fonction d'onde est locale et continue, selon l'équation de Schrödinger. Rappelons que la non-localité

[55]Cela vient du fait qu'ils sont définis par le phénomène de décohérence : à moins qu'on ne parvienne à les rendre de nouveau cohérents, ils évolueront à l'avenir sans interférer entre eux. Il faut se rendre compte que le fait de parvenir à les rendre cohérents est une condition extrême contraignante : dans l'exemple de l'équation 2.5, cela suppose que les machines des deux mondes retrouvent des états quasi-identiques, jusque dans leurs moindres parties atomiques. Or au bout de quelques nanosecondes, il est raisonnable de considérer qu'au moins un atome de la machine sera dans des états orthogonaux dans les deux mondes. Dans l'équation 2.6 qui inclut en plus un physicien, il serait encore plus difficile de rendre les deux mondes de nouveau cohérents.

[56]Wallace (2008), section 4.6, défend une telle position. Vaidman (2009) plaide pour une conception épistémique des probabilités, même s'il reconnaît qu'elle est difficile à établir.

dans l'interprétation orthodoxe venait de la réduction de la fonction d'onde, qui est ici absente (dans celle de Bohm, elle provenait du rôle de guide de la fonction d'onde pour les particules ponctuelles ; ici, elles n'existent pas). On pourrait soulever l'objection suivante : l'univers everettien prétend être local, mais le théorème de Bell (1964b), additionné à l'argument d'EPR (1935), ne permet-il pas de conclure que l'univers lui-même est non-local ? C'est en effet une lecture courante[57]. Mais il ne faut pas oublier, ainsi que le rappellent les bons ouvrages, que le théorème de Bell suppose l'existence de « faits », ou de résultats de mesures, à propos de l'expérience d'EPR. Or l'interprétation des mondes multiples nie que de tels faits existent — pour l'univers ; ils existent seulement dans chaque monde, mais l'argument est à propos de l'univers. Dès lors, l'interprétation des mondes multiples échappe à l'argument concluant à la non-localité de l'univers et elle peut être locale.

Notons une dernière caractéristique de l'interprétation des mondes multiples : elle permet à la mécanique quantique de s'appliquer à l'ensemble de l'univers. Elle ne suppose pas de division entre un « système », distingué d'un « observateur » qui constate les résultats de mesures. Elle permet à l'observateur d'être à l'intérieur du système en question.

3.3 Conclusion de la présentation des différentes interprétations

Au fil des sections 1 à 3, j'ai présenté trois interprétations parmi les plus importantes aujourd'hui : celle, orthodoxe, des manuels contemporains, celle de la mécanique bohmienne et enfin celle des mondes multiples d'Everett (les oubliées sont notamment l'interprétation en terme d'information et celle des histoires décohérentes). J'ai présenté à chaque fois une version médiane de ces interprétations, sans entrer dans le détail des différentes versions défendues par les uns ou les autres. Il peut être bon de récapituler à présent les positions de ces interprétations sur quelques caractéristiques (la présentation est volontairement schématique). Je présente à cet effet le tableau 2.1, p. 73. Il met en évidence à quel point ces trois interprétations donnent des images du monde très diverses.

4 En quel sens ces interprétations sont-elles équivalentes ?

Les interprétations qui viennent d'être présentées décrivent des mondes extrêmement différents les uns des autres, avec des entités et des caractéristiques parfois

[57] Pour la présentation du détail de l'argument, je renvoie par exemple à Albert (1992), chapitre 3.

caractéristique	**interprétation orthodoxe**	**interprétation bohmienne**	**interprétation everettienne**
entités composant le monde	systèmes quantiques avec objets macroscopiques	fonction d'onde et positions des particules	fonction d'onde avec mondes quasi-classiques
déterminisme	indéterministe	déterministe	déterministe
interprétation des probabilités	objective	épistémique	objective
objet des prédictions de la théorie	résultats de mesures (toute observable)	positions des particules	paris des agents
localité	non-locale	non-locale	locale
formulation mathématique de la théorie	éq. de Schrödinger, postulat de projection et règle de probabilité	éq. de Schrödinger et équation guidante	éq. de Schrödinger

TABLEAU 2.1 – Synthèse schématique de quelques caractéristiques des interprétations présentées dans les sections 1 à 3.

opposées. Pour appliquer empiriquement la théorie, ces interprétations ne considèrent pas les mêmes faits et les objets de leurs prédictions sont différents. Elles sont aussi associées naturellement à des formulations mathématiques différentes de la mécanique quantique. Pourtant, elles sont censées s'appliquer à ce que l'on décrit, dans un langage commun ou quasi-classique, comme « des mêmes expériences », qui ne dépendent pas de l'interprétation adoptée. Quelle que soit l'interprétation de la théorie que le physicien utilise, il doit être en mesure de tirer des prédictions de la théorie afin de confronter ces prédictions à l'expérience. Comment des physiciens qui adoptent des interprétations différentes pourront-ils comparer leurs prédictions, si elles s'expriment différemment et ne portent pas sur les mêmes faits ? Le fait que les probabilités que chacun prédit soient identiques ne suffit pas, si ces probabilités ne sont pas interprétées de la même façon et ne réfèrent pas aux mêmes faits. Ils doivent être en mesure d'établir une certaine équivalence entre leurs approches interprétativement différentes. Le but de cette section est de dire si les interprétations quantiques qu'on a présentées (orthodoxe, bohmienne, everettienne) conduisent effectivement à des prédictions équivalentes, empiriquement discriminables — en abrégé : étudier l'équivalence entre les interprétations quantiques. Je vais montrer qu'elles ne sont pas empiriquement discriminables, en précisant en quel sens cela doit être compris. Je dois indiquer que l'objectif de la discussion est seulement de préciser le sens selon lequel la littérature dit habituellement que les interprétations de la mécanique quantique sont empiriquement équivalentes. Mon but n'est pas de discuter de certaines expériences qui ont été proposées pour montrer, par exemple, que la mécanique bohmienne conduit à des prédictions différentes de l'interprétation des mondes multiples[58], et je mets de côté de telles objections.

L'application de la théorie à l'expérience procède en plusieurs étapes que je vais retracer. Dans un premier temps (sections 4.1 et 4.2), je discute seulement des probabilités que conduisent à prédire les différentes interprétations de la théorie. Je montre que, si elles ne sont pas identiques pour toutes les expériences concevables, elles le sont pour toutes les expériences réalisables : il existe en ce sens une identité prédictive. Ensuite, j'aborde le fait que les interprétations quantiques ne rattachent pas ces probabilités aux mêmes faits (section 4.3). Enfin, je montre en quel sens les prédictions sont appliquées de façon similaire et pourquoi les interprétations sont empiriquement indiscriminables (section 4.4).

[58]Cf. par exemple la discussion des trajectoires « surréalistes » de Barrett (2000). Il montre que ces exemples échouent à montrer des différences de prédictions entre Bohm et Everett.

4.1 Des prédictions probabilistes, à partir d'une même fonction d'onde

Commençons par comparer les probabilités que sont amenées à prédire les différentes interprétations quantiques, avec la formulation mathématique de la théorie qui leur est associées. Pour cela, il est utile de classer les interprétations en deux groupes : d'une part, celles qui ne supposent pas de réduction de la fonction d'onde (ici : la mécanique bohmienne et l'interprétation des mondes multiples), d'autre part, celles qui supposent une réduction (ici, l'interprétation orthodoxe[59]). Comparer ces deux groupes d'interprétations va être plus délicat que de comparer des interprétations au sein d'un groupe donné, par exemple Bohm et Everett. Les différentes interprétations pourraient traiter différemment une expérience donnée, si l'interprétation orthodoxe suppose qu'il y a eu une réduction entre le début et la fin de l'expérience. Pour cette raison, je vais procéder en deux temps : je discute tout d'abord des prédictions pour lesquelles l'interprétation orthodoxe ne suppose pas qu'il y a eu de réduction entre la préparation du système et la mesure (c'est l'objectif de cette section 4.1) ; puis je discute si l'hypothèse d'une réduction antérieure modifie les prédictions dans le cas général (section 4.2).

Considérons une expérience que la formulation orthodoxe de la mécanique quantique décrit ainsi : un système est préparé dans un état initial, il évolue selon l'équation de Schrödinger et une mesure est effectuée sur ce système (aucune réduction n'a eu lieu avant cette mesure finale). On pose la question : les probabilités vis-à-vis des différents résultats possibles, formulées selon l'une ou l'autre des interprétations quantiques, sont-elles identiques ? Autrement dit, les interprétations conduisent-elles à faire les mêmes prédictions ? Notons que je parle ici seulement des probabilités attachées aux divers résultats, sans chercher encore à spécifier comment ces probabilités doivent être reliées au monde (ce sera l'objet des sections 4.3 et 4.4).

Puisqu'il n'y a pas de réduction de la fonction d'onde avant la mesure finale, la mécanique quantique orthodoxe estime que la fonction d'onde évolue selon l'équation de Schrödinger. Selon la mécanique bohmienne et selon l'interprétation des mondes multiples, l'évolution de la fonction d'onde se fait selon cette même équation de Schrödinger. Comme l'état initial est le même selon toutes les interprétations, on en déduit que la fonction d'onde évolue de façon identique selon toutes les interprétations. Sa

[59] Je rappelle que j'exclue de mon étude la théorie dite GRW, d'après les propositions de Ghirardi, Rimini et Weber (1985, 1986), qui suppose une dynamique de réductions spontanées de la fonction d'onde. Elle conduit à des prédictions différentes des autres interprétations et pourrait être discriminée dans un futur proche. J'ai indiqué que je me concentre en effet sur les seules interprétations quantiques qui ne sont pas discriminables empiriquement (laquelle notion va être explicitée dans cette section).

valeur juste avant la mesure finale est la même.

À partir de cette même fonction d'onde, les interprétations quantiques peuvent chacune en tirer des prédictions probabilistes. Commençons par le cas simple de la mesure d'une position (je traite du cas général plus bas). Selon toutes les interprétations, c'est le module carré de la fonction d'onde, $|\psi(x,t)|^2$, qui donne la probabilité que le résultat de la mesure de la position soit x ; c'est la loi dite de Born. Selon la mécanique quantique orthodoxe, cette loi est en fait un postulat. La mécanique bohmienne la déduit à partir du postulat de l'équilibre quantique et de l'équation guidante, en établissant que la densité de probabilité des particules est toujours donnée par ce module carré[60]. L'interprétation des mondes multiples, de son côté, établit le lien entre la fonction d'onde et les probabilités à partir de la théorie de la décision[61]. Que la loi donnant la probabilité de mesure égale à $|\psi(x,t)|^2$ soit un postulat ou un théorème, elle est partagée par toutes les interprétations et formulations de la mécanique quantique. On en déduit que les interprétations quantiques formulent toutes les *mêmes prédictions* pour des mesures de position, dans le cas où il n'y a pas de réduction intermédiaire dans la formulation orthodoxe.

Considérons à présent le cas de la mesure d'une observable qui n'est pas une position. Le même raisonnement peut être appliqué, sauf pour l'interprétation bohmienne — du moins directement. La mécanique bohmienne fait en effet des prédictions, au sens strict, seulement pour les positions des particules qui composent le système. Si on veut que la mécanique bohmienne puisse faire une prédiction sur une autre grandeur physique qu'une position, il faut trouver le moyen de réduire cette prédiction à une prédiction sur des positions de particules. Heureusement, cela peut être fait. Il est aujourd'hui largement reconnu que toute mesure peut être analysée, en dernière instance, comme une mesure de position[62]. Le consensus porte sur le fait suivant : si on les analyse dans le détail, tous les types de mesures existants et tous les appareils utilisés en laboratoire mettent en jeu le déplacement d'au moins un atome dans le monde. Cela est d'ailleurs cohérent avec le fait qu'on insiste généralement pour qu'une mesure ait un effet un tant soit peu macroscopique. Par exemple, la mesure d'un spin avec un appareil de Stern-Gerlach revient à identifier la branche, haute ou basse, que la particule emprunte en sortie de l'appareil. Les capteurs d'énergie ou d'impulsion enregistrent les résultats de mesures dans la position d'aiguilles (donc d'atomes), ou dans l'affichage digitaux de chiffres qui mettent en jeu le mouvement

[60] Cf. section 2.2.
[61] Cf. section 3.1.
[62] Cf. par exemple Albert (1992), p. 169-170, Bell (1987), p. 10, 34 et Feynman (2007), p. 71.

d'électrons. La mesure d'une observable quelconque se traduit par une modification de la position d'au moins une particule, qui fonctionne comme un enregistrement de cette mesure. Par conséquent, la prédiction d'une observable quelconque se réduit à la prédiction de positions de particules. La mécanique bohmienne, qui ne fait à strictement parler que des prédictions de positions de particules, est donc capable de prédire indirectement la valeur de n'importe quelle observable. La discussion menée plus haut pour les mesures de position peut être reconduite : on en conclut que les toutes les interprétations quantiques formulent les mêmes prédictions pour toutes les observables, lorsque l'interprétation orthodoxe ne suppose pas qu'il y a de réduction intermédiaire de la fonction d'onde. Pour la suite, je supposerai que la réduction des mesures d'observables à des mesures de position est possible et je ne parlerai que de mesures de position.

4.2 La réduction de la fonction d'onde entraîne-t-elle une différence prédictive ?

Qu'en est-il lorsque la formulation orthodoxe suppose qu'une réduction a eu lieu au cours de l'expérience, avant la mesure finale ? Les interprétations quantiques conduisent-elles à des prédictions identiques pour les résultats de la mesure finale ? L'objet de cette section est de répondre à ces questions et de préciser à quelles conditions les interprétations avec ou sans réduction peuvent conduire à des prédictions différentes. Je vais montrer que des différences peuvent exister, mais que les expériences qui peuvent le mettre en évidence sont conceptuellement compliquées et extrêmement difficiles à réaliser[63].

L'interprétation orthodoxe suppose qu'il existe une réduction de la fonction d'onde lors de certaines interactions. Pour les besoins de la discussion, supposons que cette limite soit fixée ainsi : la réduction a lieu dès lors qu'une particule interagit avec un certain appareil M (ou un appareil plus gros). Par exemple, cet appareil M correspond à l'« appareil de mesure macroscopique », ou à toute autre qualification de ce type. On pourra ultérieurement déplacer cette limite, en la supposant davantage microscopique, ou davantage macroscopique ; il suffit pour le moment que cette limite existe. L'expérience qu'on considère est la suivante : en A, un électron est préparé dans un état initial donné ; en B, il arrive sur cet appareil M et interagit avec lui : selon l'interprétation orthodoxe, une réduction a lieu, pour les autres interprétations, aucune réduction n'a lieu (je vais préciser l'interaction dans un instant) ; enfin, une

[63] Je m'appuie ici notamment sur Albert (1992), chapitre 5 et Bacciagaluppi (2008).

mesure est effectuée en C. La question à laquelle il s'agit de répondre est : à quelles conditions existe-t-il une différence entre les prédictions de l'interprétation orthodoxe et celles des interprétations sans réduction, pour la mesure en C ? La réponse à cette question va apparaître beaucoup plus compliquée qu'elle ne peut sembler de prime abord.

Pour fixer les idées, on suppose que l'appareil M mesure une certaine propriété de l'électron, qu'on appellera m. On fait l'hypothèse qu'il existe deux états propres pour cette observable : $|+\rangle$ et $|-\rangle$. L'électron est initialement dans l'état $\frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle_e + |-\rangle_e)$. L'appareil M réalise une mesure idéale, au sens où on l'a définie à la section 3.1 : lors de l'interaction avec l'électron, il passe d'un état où il est prêt à fonctionner $|\text{prêt}\rangle_M$ à un état dit intriqué :

$$|\text{prêt}\rangle_M \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle_e + |-\rangle_e) \qquad \longmapsto \qquad \frac{1}{\sqrt{2}}(|« + »\rangle_M |+\rangle_e + |« - »\rangle_M |-\rangle_e) \tag{2.7}$$

Pour les interprétations qui ne supposent pas de réduction, le membre de droite de l'équation 2.7 est l'état de la particule et de l'appareil après l'interaction en B. Selon l'interprétation orthodoxe en revanche, l'interaction donne lieu à une réduction de cet état, qui devient

$$|« + »\rangle_M |+\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.8}$$

$$|« - »\rangle_M |-\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.9}$$

Après cette interaction en B, l'état de la particule et de l'appareil dépendent de l'existence d'une réduction de la fonction d'onde. À états différents, prédictions différentes : comme c'est l'état qui détermine les probabilités des prédictions de la mesure finale en C, celles-ci dépendent, en général, de l'existence d'une réduction de cet état — plus exactement, on peut affirmer qu'il existe des observables pour lesquelles les prédictions théoriques seront différentes. On sait aujourd'hui que différents facteurs concourent à ce que ces prédictions différentes soient difficiles à mettre en évidence expérimentalement. Ainsi que je vais le montrer, elles correspondent à des observables extrêmement difficiles à mesurer, tandis que toutes les observables traditionnelles et plus faciles à mesurer ne conduisent à ne prédire aucune différence.

Comment faire en sorte de départager les états décrits par l'éq. 2.7 ou par les éq. 2.8 et 2.9 ? L'idée la plus naturelle est peut-être de chercher de nouveau à mesurer l'état la propriété m de l'électron. Selon l'interprétation orthodoxe, si l'état de l'ensemble

est donné par l'éq. 2.8, ce qui s'est produit avec la probabilité 50 %, la mesure en C doit révéler un état $|+\rangle$. De même, avec une probabilité 50 %, l'état de l'ensemble était donné par l'éq. 2.9 et la mesure en C doit révéler un état $|-\rangle$. Du côté des interprétations qui n'ont pas supposé de réduction, l'état qui figure dans le membre de droite de l'éq. 2.7 conduit à prédire aussi une probabilité 50 % pour chacun des deux résultats + et - , puisque c'est le facteur $\frac{1}{\sqrt{2}}$ qui est devant chacun des deux états $|+\rangle_e$ et $|-\rangle_e$. Par conséquent, les prédictions seront rigoureusement les mêmes, selon que l'interprétation suppose ou non une réduction. La mesure de l'observable m pour l'électron ne permet pas de mettre en évidence une différence prédictive. De même, par symétrie, une mesure en C portant sur l'état de l'appareil M lui-même par un autre appareil M' donnerait des prévisions de 50-50 dans les deux cas.

Il est important d'expliciter quelques conséquences de ce raisonnement. Supposons que l'interprétation orthodoxe ne considère plus que la réduction ait lieu en B avec l'appareil M, mais en C avec l'appareil M' (elle serait alors dans le cas des autres interprétations, qui ne supposent pas qu'une réduction a eu lieu en B). D'après ce qu'on a montré, cela conduirait encore l'interprétation orthodoxe aux mêmes prédictions. Autrement dit, si on considère seulement le résultat de la mesure de M' en C, on peut tout aussi bien supposer (par commodité de calcul) que la réduction a eu lieu en B avec M ou en C avec M' sans changer les prédictions en C. L'endroit exact de la réduction n'importe pas si on ne s'intéresse qu'au résultat de la mesure finale[64]. Il y a à cela deux conditions. La première est que, dans le cas où on suppose qu'une réduction a eu lieu en B, le résultat de la mesure doit demeurer inconnu et le système doit être représenté formellement par un état mixte (ce sont les probabilités subjectives des éq. 2.8 et 2.9). La seconde condition est que la mesure finale porte sur une observable qui ne concerne que le système initial. Par conséquent, dans tous les cas où on ne s'intéresse qu'à une seule mesure finale sur un système donné, l'interprétation orthodoxe conduira aux mêmes prédictions que les autres interprétations sans réduction (Bohm et Everett) et on ne pourra pas mettre en évidence de différences.

On en déduit que si on veut mettre en évidence l'existence d'une réduction lors d'une interaction entre un système et un appareil M, il ne suffit pas d'effectuer une mesure d'une observable du système seul, ou de l'appareil seul. Il est nécessaire de considérer une observable portant sur l'ensemble du système et de l'appareil. Par exemple, considérons l'observable W s'appliquant à l'ensemble de l'électron et de

[64] C'est ce qu'on appelle parfois la mobilité de la coupure de von Neumann entre le sujet et l'objet, en référence au résultat qui a été montré dans le manuel de von Neumann (1955), chapitre VI. Cf. aussi par exemple Bacciagaluppi (2008), section 4.1.1.

l'appareil M et qui a pour vecteurs propres $\frac{1}{\sqrt{2}}(|« + »\rangle_M|+\rangle_e + |« - »\rangle_M|-\rangle_e)$ et $\frac{1}{\sqrt{2}}(|« + »\rangle_M|+\rangle_e - |« - »\rangle_M|-\rangle_e)$, avec respectivement les valeurs propres 1 et -1. Cette observable va faire l'objet de prédictions différentes, selon qu'une réduction a ou non eu lieu en B. Si l'état après l'interaction en B n'a pas été réduit et est donné par le membre de droite de l'éq. 2.7, alors il est un vecteur propre de W et la mesure de W en C donnera la valeur propre 1 avec une probabilité de 100 %. En revanche, si l'état a été réduit en B et est donné, par exemple, par l'éq. 2.8, alors on montre facilement que la mesure de W doit donner la valeur 1 ou -1 avec une probabilité à chaque fois de 50 %. Ce sont aussi les valeurs prédites si l'état a été réduit selon l'éq. 2.9. On en déduit, globalement, que si une réduction a eu lieu en B, alors la mesure de W doit donner la valeur 1 ou -1 avec une probabilité de 50 % à chaque fois. On tient ici une observable pour laquelle les prédictions auxquelles conduisent les interprétations avec ou sans réduction sont différentes.

Le problème est que les observables telles que W, qui permettent de mettre en évidence cette différence prédictive, sont en pratique extrêmement difficiles à mesurer en laboratoire. Cela vient du fait que, pour être capable de déceler une différence, il faut empêcher que l'environnement ne vienne interférer avec l'état du nouveau système {électron + machine M}, ce qui conduirait à supprimer la différence entre les prédictions. Voyons le détail de l'explication.

Supposons que, à un moment quelconque B' entre l'interaction en B et la mesure en C, le système {électron + machine M} entre en interaction avec une seule molécule, de sorte qu'il existe ensuite une corrélation entre l'état du système et celui de la molécule (techniquement, leurs états deviennent intriqués). Par exemple, la molécule passe dans des états $|\approx +\rangle_m$ et $|\approx -\rangle_m$. L'état de l'ensemble {électron + machine + molécule} est à présent le suivant. Selon l'interprétation orthodoxe, l'état du système {électron + machine} était donné par les éq. 2.8 et 2.9, de sorte qu'on a, après B',

$$|\approx +\rangle_m|« + »\rangle_M|+\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.10}$$

$$|\approx -\rangle_m|« - »\rangle_M|-\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.11}$$

Pour les interprétations qui n'ont pas supposé de réduction, l'état avant B était donné par l'éq. 2.7 et devient

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\big(|\approx +\rangle_m|« + »\rangle_M|+\rangle_e + |\approx -\rangle_m|« - »\rangle_M|-\rangle_e\big) \tag{2.12}$$

Cela va annihiler toutes les différences prédictives vis-à-vis de W. En effet, on

peut noter que l'intrication du système {électron + machine} avec la molécule est formellement identique à l'intrication qui avait eu lieu précédemment entre l'électron et la machine. La conclusion d'une discussion que j'avais menée alors est que, si on s'intéresse seulement à une observable portant sur le système initial (et non pas l'ensemble de ce qui devient intriqué), les probabilités des différents résultats seront les mêmes, que l'on suppose qu'il y a eu ou non une réduction lors de l'interaction d'intrication. Ici, je m'intéresse effectivement seulement aux résultats pour l'observable W, qui porte sur le système initial {électron + machine}. Par conséquent, je peux mener les calculs comme si l'interaction avec la molécule donnait lieu à une réduction. Notamment, dans le cas des interprétations qui n'ont pas de réduction, l'état donné par l'équation 2.12 donnera les mêmes résultats pour W si on considère qu'il est réduit ; on obtient :

$$|\approx +\rangle_m |« + »\rangle_M |+\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.13}$$

$$|\approx -\rangle_m |« - »\rangle_M |-\rangle_e \qquad \text{avec une probabilité de 50 \%} \tag{2.14}$$

Or il s'agit là, pour selon les interprétations *sans* réduction, exactement du même état que celui selon l'interprétation orthodoxe *avec* réduction, donné par les éq. 2.10 et 2.11. Par conséquent, les prévisions sont à présent de 50-50 pour les valeurs propres 1 et -1 de W. L'interprétation sans réduction n'a plus sa prédiction de 100 % pour la valeur propre 1. Autrement dit, la simple interaction d'une seule molécule avec le système {électron + machine } suffit à rendre impossible pour ce système la différence entre les prédictions des interprétations avec ou sans réduction. On nomme ce phénomène la *décohérence* : un système perd sa cohérence (qui était exploitée dans la mesure de W) en raison des interactions avec son environnement[65]. C'est la raison pour laquelle la mise en évidence expérimentale des différences prédictives entre les interprétations avec ou sans réduction soit si délicate à réaliser.

On peut, bien entendu, envisager diverses astuces pour maintenir une différence prédictive. Une première stratégie pourrait être de mesurer une observable concernant le système total {électron + machine + molécule}, puisqu'on restaurerait ainsi la différence prédictive. Ce n'est que déplacer le problème : cela revient à contrôler parfaitement tout ce qui est susceptible d'interagir avec le système en question et de le prendre en compte. Une autre stratégie est d'empêcher la molécule d'interagir avec le système {électron + machine}. Cela suppose d'empêcher en fait toute

[65]Pour une présentation des enjeux de la décohérence vis-à-vis des interprétations de la mécanique quantique, je renvoie à Bacciagaluppi (2008).

autre molécule, photon, etc., d'interagir avec lui : le système doit être parfaitement isolé de toute interaction extérieure. Cela est expérimentalement réalisable sur de petits systèmes (atomes, molécules) mais devient extrêmement délicat sur de plus gros systèmes (comme la machine M entière). C'est néanmoins la voie que suivent les expérimentateurs, qui parviennent à faire interférer des systèmes de plus en plus gros. En montrant que les résultats obtenus dans ces expériences sont conformes aux prédictions obtenues en supposant qu'il n'existe pas de réduction de la fonction d'onde, ils parviennent à repousser la limite en dessous de laquelle la réduction ne peut avoir lieu. L'amélioration des dispositifs expérimentaux devrait permettre de repousser cette limite toujours plus loin, ou au contraire de montrer l'existence d'une réduction.

Il existe en réalité une dernière raison qui va faire passer de « très difficile » à « impossible » le fait d'observer une différence entre les prédictions de l'interprétation orthodoxe et des interprétations sans réduction de Bohm et d'Everett. Il faut rappeler que l'interprétation orthodoxe ne propose pas de critère clair à propos de l'application du postulat de projection de la fonction d'onde. Les physiciens peuvent toujours relever le niveau auquel ils supposent qu'une réduction a lieu et supposer que l'évolution du système se fait seulement selon l'équation de Schrödinger (la réduction n'a lieu qu'à la dernière mesure). Ce faisant, ils retrouvent les mêmes prédictions que les interprétations sans réduction. Le flou inhérent à la formulation orthodoxe lui permet de ne pas prendre le risque d'une contradiction avec les interprétations sans réduction. Elle peut procéder à une fuite en avant, repoussant toujours plus le moment de la réduction. Cette fuite pourra être plus rapide que le progrès des expérimentateurs. En réalité, les expérimentateurs seront eux-mêmes limités dans leur avancée. Il faut en effet apporter une nuance par rapport au paragraphe précédent, dans lequel j'indiquais que l'amélioration des dispositifs expérimentaux devrait permettre de tester le niveau de (non-)existence de la réduction. Empêcher la décohérence d'un système suppose de l'isoler de toutes formes d'interactions d'avec l'environnement. Concrètement, les systèmes sont placés dans le vide et à une température proche du zéro absolu. Une telle expérience n'est pas applicable à un chat que l'on souhaite pouvoir conserver vivant. Elle ne peut pas l'être non plus à une partie du corps humain. Dès lors, une interprétation qui proposerait par exemple que la réduction de la fonction d'onde a lieu dans la glande pinéale par l'effet de la conscience [66] ne saurait jamais être distinguée expérimentalement des interprétations d'Everett ou de Bohm.

[66] Je fais ici allusion aux positions de Descartes (retranscrites dans une version quantique) et de Wigner (1961).

La conclusion de la discussion de cette section et de la précédente est la suivante. Les interprétations conduisent à formuler des prédictions qui prennent la forme de *probabilités*, données par la règle de Born. En ce sens, elles forment des prédictions qui peuvent être directement comparées (je ne considère pas encore la question de ce sur quoi ces probabilités portent). Les interprétations quantiques se divisent en deux groupes : celles qui ne supposent pas l'existence d'une réduction de la fonction d'onde (celles de Bohm et d'Everett) et celle qui en suppose une (l'interprétation orthodoxe). Celles du premier groupe conduisent à des prédictions identiques en toute circonstance. La question qui reste porte sur la comparaison avec l'interprétation orthodoxe. Malgré le flou qui existe sur la formulation orthodoxe de la mécanique quantique, j'ai indiqué que cette formulation peut être comprise comme une invitation à déplacer toujours plus vers le domaine macroscopique le moment de la réduction de la fonction d'onde ; c'est ainsi qu'elle rejoint le mieux les interprétations sans réduction. Dès lors, à strictement parler, les interprétations avec ou sans réduction conduisent à des prédictions différentes si on considère l'ensemble des expériences envisageables ; mais si on se limite à toutes les expériences réalisables, les prédictions sont rigoureusement identiques. Il n'y a pas d'expérience possible dans lesquelles les interprétations donneraient des prédictions différentes. C'est en ce sens là que je dirai que les interprétations quantiques présentées dans ce chapitre conduisent à des prédictions identiques.

4.3 Des prédictions à propos de faits différents

Dans la section précédente, j'ai montré que les probabilités des résultats de mesures que prédisent les différentes interprétations de la mécanique quantique sont identiques, pour toutes les expériences réalisables. Ce faisant, j'ai volontairement choisi de parler de manière floue de ces « probabilités de mesure », renvoyant à plus tard la question de l'interprétation empirique de ces probabilités : à quoi ces probabilités correspondent-elles dans le monde que décrit l'interprétation ? L'objectif de cette section est de préciser ces interprétations empiriques et d'apprécier leurs différences.

La première nouveauté des interprétations quantiques est qu'elles ne reconnaissent pas les mêmes faits dans le monde. Lorsque l'une considère qu'il y a un résultat à la mesure de telle quantité, une autre peut dire qu'il n'existe pas de fait à propos du résultat. Reprenons un exemple qui a déjà été abordé, décrit à l'aide du langage courant : un électron dont l'état de spin selon z est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$ est envoyé dans un appareil de Stern-Gerlach pour mesurer son spin selon z. Supposons que l'électron soit

observé en sortie dans la branche supérieure, révélant un état $|\uparrow\rangle$ et une valeur propre $+1$. L'interprétation orthodoxe considère qu'il existe un fait à propos du résultat de mesure : dans l'image du monde qu'elle décrit, il existe un résultat à la mesure en question et il vaut $+1$. L'interprétation bohmienne considère aussi qu'il existe un fait à propos de ce résultat (elle considère d'ailleurs qu'il existe aussi une position précise à l'électron en tout temps, qui a déterminé sa trajectoire dans l'appareil). Mais selon l'interprétation des mondes multiples, il n'existe pas de fait à propos du résultat de la mesure. En effet, elle décrit l'ensemble constitué de l'électron et de l'appareil de Stern-Gerlach comme étant dans une superposition des deux résultats :

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{« }\uparrow\text{ »}\rangle_m|\uparrow\rangle_e + |\text{« }\downarrow\text{ »}\rangle_m|\downarrow\rangle_e) \tag{2.15}$$

L'univers everettien comprend à la fois un monde dans lequel le résultat est $|\uparrow\rangle$ et un autre dans lequel le résultat est $|\downarrow\rangle$: pour l'univers dans son ensemble, il n'existe pas *un seul* résultat et en ce sens il n'existe pas de fait à propos du résultat[67]. Ainsi, l'interprétation des mondes multiples conduit à affirmer, devant un physicien qui observe un appareil de mesure et de façon contraire au sens commun : « il n'existe pas de fait à propos de ce résultat ». En revanche, elle ne nie pas qu'il puisse exister des faits *relativement* à un monde particulier. En l'occurrence, dans le monde que je décrivais plus haut, le résultat de mesure est $+1$. Les interprétations quantiques ne reconnaissent pas les mêmes faits dans une même expérience[68].

Il faut prendre la mesure de la nouveauté de cette caractéristique des interprétations quantiques. Jamais dans aucune autre théorie physique, les images du mondes

[67]On pourrait être tenté de donner à l'expression « il n'existe pas de fait à propos de tel résultat » un sens trivial dans l'interprétation d'Everett. Ce sens serait le suivant : on peut considérer que, étant donné l'évolution de l'univers depuis la nuit des temps, il n'existe à coup sûr plus aucun fait à propos de quoi que ce soit, puisqu'il existe certainement des mondes dans lesquels le fait en question n'est pas réalisé. Ce n'est pas en ce sens qu'il faut comprendre l'expression. Un sous-entendu mérite d'être explicité : l'instant du début de l'expérience est pris pour origine des temps et c'est le point de départ de la fonction d'onde de l'univers. En ce sens, il existe un fait à propos de la préparation initiale de l'expérience. En disant qu'« il n'existe pas de fait à propos de tel résultat », on ne porte un jugement que sur la partie de l'univers qui nous intéresse dans l'expérience (ici, l'électron et l'appareil de Stern-Gerlach).

[68]Notons que lorsque je dis que différents faits sont identifiés par les interprétations, c'est toujours dans une même expérience. Cela est à distinguer d'une toute autre façon dont un formalisme peut être interprété empiriquement. Prenons l'exemple d'une théorie de la gravitation qui décrit le mouvement d'une planète autour d'un astre immobile. L'équation d'un mouvement elliptique peut prendre la forme de $(\frac{x}{a})^2 + (\frac{y}{b})^2 = 1$, où x et y sont les coordonnées cartésiennes de la planète et a et b les demi-grands axes de l'ellipse. Une première interprétation de cette équation peut concerner la planète Mars et une seconde peut concerner la Terre. Il s'agit là d'interprétations différentes d'une équation. Contrairement aux différentes interprétations de la mécanique quantique (et par exemple de l'équation de Schrödinger), elles ne portent pas ici sur la même situation expérimentale.

proposées pour une même théorie n'ont été aussi différentes entre elles. Jusque-là, les formulations différentes d'une même théorie, avec leurs interprétations, se sont toujours retrouvées d'accord sur l'existence de faits expérimentaux ; tout au plus, leur assignaient-elles des variables différentes. Prenons l'exemple des formulations lagrangienne et hamiltonienne de la mécanique classique : la première considère un lagrangien $\mathcal{L}(q, \dot{q})$ qui dépend des variables de position et de leurs dérivées temporelles premières, tandis que la seconde considère un hamiltonien $\mathcal{H}(q, p)$ qui dépend des variables de position et de l'impulsion. Soit un résultat d'une expérience : une balle de masse m arrive en x avec une vitesse v. La formulation lagrangienne note ce résultat à travers la paire de variables (x, v), tandis que la formulation hamiltonienne note la paire (x, mv). Les deux formulations considèrent qu'il existe un fait à propos de l'arrivée de cette balle ; elles le notent simplement avec des variables différentes. Dans le cas de la mécanique quantique, les interprétations ne sont même pas d'accord sur l'existence d'un fait.

La seconde nouveauté de la pluralité des interprétations quantiques est que l'objet des prédictions n'est pas le même (c'est-à-dire que les probabilités ne réfèrent pas aux mêmes choses dans le monde). Dans l'interprétation orthodoxe, les probabilités portent sur les résultats de mesures d'observables, à propos desquels il existe des faits. Dans l'interprétation de Bohm, elles portent sur les positions des particules. Ces prédictions bohmiennes sur les positions permettent, d'après la discussion menée à la section 4.1, de formuler des prédictions sur toutes les observables que considère l'interprétation orthodoxe ; néanmoins, les objets des prédictions de ces deux interprétations sont initialement différents. Dans l'interprétation des mondes multiples, les prédictions portent sur les paris que sont prêts à accepter des agents rationnels, vis-à-vis d'expériences quantiques[69]. Elles ne peuvent pas concerner les résultats de mesures ou les positions qui se produiraient dans l'univers, puisque tous se réalisent dans un monde. Elles ne peuvent pas non plus concerner les résultats dans *un monde* particulier, puisqu'il n'y en a pas un plus vrai que les autres. Ainsi, les faits qui existent selon l'interprétation orthodoxe existent aussi selon l'interprétation bohmienne (dans la mesure où les résultats d'observables quelconques se réduisent à des positions de particules), mais l'inverse n'est pas vrai (l'interprétation bohmienne considère qu'il existe des faits à propos des positions de toutes les particules, ce que ne reconnaît pas l'interprétation orthodoxe). Tous ces faits ne sont pas reconnus par l'interprétation des mondes multiples.

[69] Ces paris constituent bien des faits selon l'interprétation des mondes multiples, puisqu'ils sont formulés *avant* le résultat de l'expérience, *avant* que l'agent ne devienne en superposition.

Il n'y a donc pas en mécanique quantique de faits bruts ou de données brutes que la théorie devrait interpréter. Ce que l'une considère comme une donnée brute, par exemple le résultat d'une mesure selon l'interprétation orthodoxe, n'est qu'une illusion qui mérite d'être expliquée, par exemple à partir de l'existence de mondes parallèles pour une interprétation comme celle d'Everett. Les interprétations quantiques ne sont pas simplement des images du monde qui viennent rendre compte de certaines apparences phénoménales données. Les faits dont chaque interprétation rend compte sont propres à elle et définis par elle.

La conséquence est qu'il n'existe pas de façon neutre, vis-à-vis des interprétations quantiques, de décrire sur quoi portent les prédictions de la théorie ou quelles sont les données empiriques auxquelles elles seront comparées. Il n'y a ni faits expérimentaux neutres, ni prédictions neutres. Il n'est pas possible d'appliquer empiriquement la mécanique quantique sans faire un choix interprétatif quant à l'objet des prédictions et ce qui constitue un fait expérimental. Nécessairement, ce choix interprétatif, fût-il minime, sera en contradiction avec des positions défendues par l'une ou l'autre des autres interprétations. Je tirerai d'autres conséquences de cela lorsque je discuterai de la conception philosophique des théories scientifiques, au chapitre suivant.

4.4 Une équivalence empirique

La section précédente a montré que les faits reconnus par les différentes interprétations quantiques et à propos desquels elles formulent des prédictions probabilistes, ne sont pas les mêmes. Les interprétations conduisent à formuler des prédictions probabilistes identiques (section 4.2), mais les objets de ces prédictions ne sont pas les mêmes (section 4.3). Comment, dès lors, peuvent-elles parvenir à une équivalence empirique ? Étudier cette équivalence entre les interprétations quantiques suppose de répondre à deux problèmes. Tout d'abord, il s'agit de savoir comment les interprétations quantiques parviennent à s'appliquer à ce qu'on décrit dans le langage courant comme une « même expérience », en dépit du fait qu'elles reconnaissent des faits différents. Ensuite, on peut chercher à déterminer en quel sens l'équivalence empirique existe. Cette section aborde ces deux problèmes l'un après l'autre.

Commençons par étudier comment les prédictions obtenues par les diverses interprétations sont appliquées empiriquement à une même expérience. Reprenons l'exemple de la mesure de spin de la section précédente 4.3. Cette expérience a été présentée et identifiée dans les termes du langage courant : on y parle de la présence d'un détecteur, de l'existence d'un résultat de mesure et on pourrait ajouter un physicien qui

fait l'expérience psychologique de lire le résultat de la mesure du spin. Ces faits s'inscrivent dans l'image du monde commune, selon laquelle des objets macroscopiques et des personnes existent et ont des propriétés. C'est ce langage courant qui permet à des physiciens qui adoptent des interprétations différentes d'identifier qu'ils s'intéressent à une *même* expérience. C'est, pour ainsi dire, le premier degré permettant une comparaison entre les prédictions faites avec des interprétations différentes.

En plus de l'utilisation du langage classique, il existe selon moi un second facteur permettant d'expliquer comment différentes interprétations peuvent s'appliquer à la même expérience[70]. Il consiste en un usage que je qualifierai de *souple* ou de *flou* des éléments de langage. Cela consiste, pour un physicien qui adopte une interprétation, à utiliser des termes non pas dans le sens de cette interprétation, mais dans un sens plus courant. Par exemple, un everettien peut dire « il existe un résultat de mesure pour le spin », non pas en référence à l'état de l'univers (ce qui serait faux, comme je l'ai indiqué), mais seulement de manière relative au monde à partir duquel il parle. En adoptant ce second sens de façon implicite, il rejoint alors les bohmiens et les orthodoxes dans leur utilisation du langage. Il en ressort qu'une telle phrase, bien qu'acceptée par tous, n'a pas exactement le même sens pour tous les physiciens : pour certains, elle est un énoncé à propos d'un fait, valable dans l'absolu, tandis que pour d'autres, elle est seulement un énoncé valable de façon relative à une partie de l'univers. De même, un everettien peut parler de « la probabilité de tel résultat », en indiquant non pas qu'un résultat va se réaliser, ni qu'il est indéterminé, mais en référence à la probabilité qu'il peut associer formellement au pari qu'il est susceptible d'accepter vis-à-vis de ce résultat. Cet usage « flou », en plus de l'utilisation du langage commun, permet aux diverses interprétations de s'appliquer aux mêmes expériences.

Puisque les interprétations quantiques peuvent appliquer la théorie aux mêmes expériences, on peut maintenant aborder la seconde question : en quel sens les interprétations quantiques sont-elles équivalentes ? Considérons tout d'abord l'interprétation orthodoxe et la mécanique bohmienne. J'ai indiqué que toutes deux reconnaissent qu'il existe un fait à propos du résultat de mesure d'une observable (la mécanique bohmienne le reconnaît à partir des faits plus fondamentaux que sont les positions des particules). Aussi, il existe un terrain sur lequel ces deux interprétations peuvent comparer directement leurs prédictions probabilistes. Les deux sont adéquates empiriquement exactement de la même façon — sous réserve de considérer seulement les expériences réalisables, cf. section 4.2.

[70] Je ne connais pas de référence indiquant cette explication que je propose.

Considérons à présent l'adéquation empirique de l'interprétation des mondes multiples. Ce point est notoirement plus délicat. Selon cette interprétation, *tous* les résultats de mesures (même ceux qui sont extrêmement peu probables) sont réalisés dans un monde. Dès lors, quel sens y a-t-il à dire que la théorie est adéquate empiriquement ? Les résultats observés ont nécessairement été prédits par la théorie, car tous le sont. Même si un physicien everetttien observe une suite de résultats extrêmement peu problables, il ne peut pas conclure à la fausseté de la théorie. Il peut juste conclure qu'il se trouve dans un des mondes que la théorie prédit, et qui doit exister (même s'il attache des probabilités de paris très faibles à ce genre de monde). Le physicien a-t-il seulement le droit de s'estimer surpris de se trouver dans ce monde ? Rien n'est moins sûr. La mécanique quantique dans l'interprétation d'Everett semble ainsi ne pas avoir véritablement de contenu empirique et ne pas pouvoir être falsifiable. Diverses solutions à ce problème ont été proposées[71] ; pour la suite, je supposerai par simplicité qu'une telle solution existe et que la mécanique quantique *est* falsifiable dans l'interprétation des mondes multiples.

Nous pouvons maintenant considérer l'équivalence entre d'un côté les interprétations orthodoxe et bohmienne (dont j'ai dit qu'elles sont équivalentes) et de l'autre celle des mondes multiples. J'ai indiqué que les faits que reconnaissent les deux premières interprétations, à savoir les résultats de mesures, ne sont pas reconnus par l'interprétation des mondes multiples, qui reconnaît de son côté les paris des agents. Plutôt que de chercher un terrain d'accord du côté des résultats de mesures, il peut être meilleur de considérer les paris des agents. Il semble en effet que ces paris peuvent constituer la base de la comparaison empirique pour les différentes interprétations[72]. Un physicien qui adopte l'interprétation orthodoxe ou bohmienne peut, en tant qu'il est un agent rationnel, utiliser les probabilités que lui fournit la mécanique quantique à propos des résultats de mesures pour formuler des paris vis-à-vis d'une expérience. Ce que les trois interprétations quantiques peuvent effectivement comparer, c'est donc les prédictions qu'elles donnent du comportements d'agents rationnels. C'est sur cette base qu'on peut se prononcer rigoureusement sur l'équivalence entre les interprétations. D'après les discussions menées plus haut, ces prédictions sont identiques — pour ce qui concerne les expériences réalisables, cf. la section 4.2. On conclut que les interprétations quantiques discutées ici sont empiriquement équivalentes, au sens où elles peuvent s'accorder sur des prédictions probabilistes identiques à propos des

[71] La solution à ce problème connu ne semble pas consensuelle aujourd'hui. Cf. par exemple Barrett (2008), section 8 et les références qu'il indique.

[72] Je remercie David Albert pour m'avoir conforté sur ce point.

paris des agents. D'une façon assez surprenante, les interprétations de la mécanique quantique (avec parmi elles deux interprétations réalistes du monde) établissent leur équivalence non pas à propos de faits dans le monde, mais à propos de comportements d'agents rationnels qui connaissent la théorie.

4.5 Conclusion sur l'équivalence entre les interprétations

Les interprétations orthodoxe, bohmienne et everettienne de la mécanique quantique conduisent à formuler des prédictions identiques au moyen de probabilités de résultats pour toutes les expériences réalisables. Selon l'interprétation adoptée, ces probabilités ne renvoient pas aux mêmes faits : il s'agit de résultats de mesures d'observables selon l'interprétation orthodoxe, de positions de particules pour la mécanique bohmienne et de paris susceptibles d'être acceptés par des agents rationnels selon l'interprétation des mondes multiples. J'ai défendu l'idée que le langage classique, ou le langage d'une interprétation utilisé de manière volontairement souple, permet aux physiciens d'attribuer leurs prédictions probabilistes à une même expérience. J'ai montré que les paris acceptables par un agent rationnel sont susceptibles de constituer une base de comparaison des différentes prédictions. C'est cela qui permet d'établir l'équivalence empirique de toutes les interprétations. On conclut donc : les diverses interprétations de la mécanique quantique conduisent à une équivalence prédictive et elles sont empiriquement indiscriminables, pour toutes les expériences réalisables.

Conclusion

La mécanique quantique est une théorie qui s'est vue proposer de nombreuses interprétations. Dans ce chapitre, j'en ai présenté trois qui sont des interprétations majeures actuellement — tout autant parmi les physiciens que les philosophes des sciences. La première est l'interprétation orthodoxe, qui figure dans les manuels universitaires. La formulation de la théorie qui y est attachée met en jeu deux lois pour la dynamique de la fonction d'onde : l'une, l'équation de Schrödinger, s'applique lorsqu'aucune mesure n'est effectuée, l'autre, le postulat de projection, régit l'évolution lors d'une mesure. L'interprétation orthodoxe décrit un monde indéterministe et non-local, dans lequel les probabilités sont interprétées objectivement. Les objets peuvent se voir attribuer des propriétés, mais celles-ci ne sont pas toujours définies. L'interprétation orthodoxe suppose l'existence d'une limite entre un monde classique et un

monde décrit quantiquement. J'ai distingué deux variantes de l'interprétation orthodoxe, à savoir une interprétation minimale et l'interprétation historique de l'école de Copenhague.

La deuxième interprétation que j'ai présentée est la mécanique bohmienne. Il s'agit d'une interprétation dite « à variables cachées », pour laquelle la fonction d'onde ne décrit pas complètement le monde. Elle ajoute des variables de position pour les particules, qui sont définies à chaque instant. Ces particules ont une évolution déterministe et non-locale. Les probabilités de la théorie sont interprétées épistémiquement : c'est par ignorance envers ces positions que nous ne pouvons prédire le résultat.

La troisième interprétation est celle d'Everett, appelée aussi l'interprétation des mondes multiples. Selon elle, la fonction d'onde suit toujours l'équation de Schrödinger, sans réduction, de sorte que tous les résultats de mesures sont réalisés, chacun dans un monde : l'interprétation décrit ainsi des mondes parallèles. L'univers selon Everett est à la fois déterministe et local. Je me suis contenté de reconstruire une version médiane de toutes ces interprétations, sans rentrer dans les subtilités défendues par les divers protagonistes : mon but a seulement été de donner une idée des grandes différences entre ces interprétations, afin qu'on soit en mesure de saisir dans les prochains chapitres les conséquences de leurs divergences. Je n'ai pas non plus critiqué dans un sens ou dans l'autre ces différentes interprétations.

Enfin, j'ai cherché à préciser comment ces interprétations donnent lieu à une équivalence empirique. J'ai montré que, s'il peut exister des différences dans les prédictions probabilistes entre l'interprétation orthodoxe qui suppose une réduction et les autres, cela n'est le cas que pour des expériences qui sont irréalisables. Dès lors, toutes les interprétations de la théorie conduisent à des prédictions identiques, pour toutes les expériences réalisables. J'ai montré ensuite que, malgré le fait que les probabilités ne renvoient pas aux mêmes faits selon les interprétations, il est néanmoins possible de les comparer. J'en ai conclu à l'équivalence empirique des interprétations de la mécanique quantique.

Chapitre 3

Différentes conceptions de ce que sont les interprétations quantiques

Introduction

À présent que les interprétations majeures de la mécanique quantique ont été présentées, il est possible de revenir sur la définition de la notion d'une théorie. Dans le chapitre 1, j'ai seulement présenté à grands traits ce qu'est l'interprétation d'une théorie en général. Ici, je quitte le cadre de la discussion des interprétations des théories en général, pour me limiter au seul cas des interprétations quantiques. Je considère tour à tour deux conceptions des théories scientifiques : celles qui ont été appelées les conceptions syntaxique et sémantique (je les aborde respectivement dans les sections 1 et 2). L'objectif du chapitre est d'examiner si ces conceptions rendent compte correctement de la situation de la mécanique quantique que j'ai décrite au chapitre précédent, avec sa pluralité d'interprétations. Trois critères feront l'objet d'une attention particulière. Tout d'abord, l'analyse doit rendre compte de l'unité théorique de la mécanique quantique à travers ses nombreuses interprétations. L'analyse doit aussi être en mesure de saisir la raison pour laquelle il existe une pluralité d'interprétations pour une théorie scientifique, comme c'est le cas en mécanique quantique. Enfin, l'analyse doit rendre compte de l'équivalence empirique de ces différentes interprétations, qui a été établie à la section 4 du précédent chapitre. Notons que ma critique des conceptions syntaxique et sémantique ne va porter que sur leur capacité à analyser correctement la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations. Je ne reprends pas ici les nombreuses critiques dont elles ont fait l'objet, de manière générale.

1 Les interprétations quantiques selon la conception syntaxique des théories

Dans cette section, j'étudie dans quelle mesure la conception dite syntaxique des théories est en mesure de rendre compte de la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. Comme je l'ai indiqué au chapitre 1, section 2.3, cette conception syntaxique n'est pas uniforme. De nombreuses positions, qui diffèrent les unes des autres dans le détail, ont été défendues par divers philosophes. Pour les besoins de la discussion, je distinguerai deux positions. La première est connue sous le nom de « Conception Dominante » (« Received View »)[1]. Elle a dominé très largement l'analyse philosophique des théories scientifiques des années 1920 aux années 50 et correspond au courant traditionnel de l'empirisme logique. En m'appuyant sur Suppe (1977), je discuterai d'une position cohérente reconstruite à partir des textes de Rudolf Carnap et de Carl G. Hempel, qui étaient les principaux artisans de cette conception traditionnelle. Sa présentation et sa discussion font l'objet des sections 1.1 et 1.2. La seconde position que je considère est celle qu'a défendue Ernest Nagel (1961). Plus tardive, elle s'éloigne de certains présupposés de la conception traditionnelle et échappe ainsi à certaines critiques qui pouvaient être faites à cette dernière. Elle est examinée aux sections 1.3 et 1.4. La thèse que je défends dans cette section est que la conception syntaxique, qu'il s'agisse de la Conception Dominante ou de celle de Nagel, n'est pas en mesure de rendre compte correctement de ce qu'est une théorie avec plusieurs interprétations comme la mécanique quantique.

1.1 Présentation de la « Conception Dominante »

Je commence par considérer dans cette section la « Conception Dominante » (« Received View ») des théories scientifiques. Elle émane du courant dit des empiristes logiques du début du XXe siècle, qui ont cherché à réduire la signification des énoncés scientifiques à leur contenu empirique, en s'aidant seulement des règles de la logique. Cela les a conduits à mener une analyse linguistique des théories scientifiques et à demander que les théories puissent être reconstruites au moyen d'un langage formel : une théorie est définie par ses énoncés — d'où le terme de « conception syntaxique ». Cette Conception Dominante s'est largement imposée dès les années 1920 et c'est seulement dans les années 50 qu'elle a commencé à être sérieusement attaquée. Notamment en réponse à ces attaques, elle évolue vers une version que Suppe qualifie

[1] L'expression est due à Putnam (1962), dans une critique qu'il en fait ; cf. Suppe (1977), p. 3.

de « finale »[2] et dont il propose une une reconstruction à partir des différents écrits de Carnap et Hempel, ses plus grands défenseurs. C'est cette position reconstruite que je vais présenter dans cette section[3]. Ce faisant, l'objectif de cette présentation n'est pas de proposer une reconstruction historiquement fidèle et je me résous à étudier une position médiane par rapport aux diverses positions . Je ne vais pas non plus exposer tous les détails et je me limite aux caractéristiques qui sont pertinentes pour la discussion à venir de son application au cas de la mécanique quantique.

L'idée sous-jacente de la Conception Dominante est qu'une théorie est une entité linguistique. Elle s'appuie sur un langage L, composé d'un langage observationnel L_O et d'un langage théorique L_T. Cela repose sur la possibilité de distinguer entre ce qui est observable et ce qui ne l'est pas[4]. Ainsi, les termes du langage L_O ne sont que des termes d'observation : ils réfèrent à des événements ou des objets concrets qui doivent être directement observables. C'est grâce à leur interprétation sémantique dans un tel domaine d'interprétation (c'est-à-dire au sens de la théorie des modèles, présentée à la section 1 du chapitre 1) que ces termes acquièrent une signification. Ce faisant, L_O reçoit ainsi « une interprétation sémantique empirique complète »[5]. De leur côté, les termes du langage L_T n'ont pas de référent directement observable. Il s'agit par exemple des symboles mathématiques du formalisme de la théorie, tels que $\vec{f}$ en mécanique classique, ou ψ en mécanique quantique. Il s'agit aussi des symboles non mathématiques tels que « les électrons »[6] ou « leur circulation sur des orbites, leurs sauts »[7].

Dans la Conception Dominante, une théorie scientifique est un système hypothético-déductif qui repose sur un petit nombre d'axiomes, permettant de déduire un grand nombre de propositions. Les axiomes sont de deux types : d'une part, il existe les axiomes théoriques T, ou postulats de la théorie. Ils sont dits théoriques parce qu'ils n'utilisent que le langage théorique L_T. D'autre part, il existe des règles de correspondance C qui consistent en des phrases mixtes, utilisant des termes à la fois de L_O et de L_T. La fonction de C est d'assurer une correspondance entre les axiomes théoriques et ce qui est d'ordre observable. On appelle TC la conjonction de T et de C fondé sur le langage L : il s'agit de la « théorie ».

L'une des motivations de la Conception Dominante est de rendre compte de la

[2]Suppe (1977), p. 50-52.

[3]Je m'appuie essentiellement sur la reconstruction que propose Suppe (1977), ainsi que sur Moulines (2006) et Vorms (2009).

[4]La définition d'une telle limite peut être évidemment sujette à caution ; j'y reviendrai plus loin.

[5]Suppe (1977), p. 86.

[6]Cf. Carnap (1973), p. 237.

[7]Cf. Nagel (1961), p. 95.

façon dont les termes théoriques de L_T acquièrent une signification. En effet, ces termes en sont initialement dépourvus, parce qu'ils n'ont par définition pas de référent observable. Le projet de Carnap est de montrer que la signification des termes théoriques peut être réduite à une signification empirique. Celle-ci sera seulement indirecte, puisque seuls les termes de L_O peuvent être interprétés directement empiriquement. Ce sont les règles de correspondance C, ces énoncés mixtes comportant des termes théoriques et observationnels, qui permettent de donner un sens empirique aux termes de L_T, en les reliant à ceux de L_O. Carnap l'énonce ainsi :

> « Toute l'interprétation (au sens strict du terme, i.e. interprétation observationnelle) qui peut être donnée pour L_T est donnée par les règles-C, et leur fonction est essentiellement d'interpréter certains énoncés contenant des termes descriptifs, et par là d'interpréter indirectement les termes descriptifs de V_T [i. e. le vocabulaire de L_T]. »[8]

Carnap insiste sur le fait que l'interprétation d'un terme, ou sa signification, doit être observationnelle et empirique. Grâce aux règles de correspondance, la signification empirique des termes de L_O est transmise à ceux de L_T.

Le problème est que ces règles de correspondance ne fournissent qu'une interprétation *partielle* pour L_T. Comme ce point va jouer un rôle important dans la discussion à venir, je vais le développer ici. La notion d'« interprétation partielle » est introduite initialement par Carnap (1939), qui n'en donne pas de définition, ce qui n'empêche pas cette notion d'être réutilisée ensuite par divers auteurs[9]. L'idée est la suivante : les termes théoriques ont une signification en plus de celle que leur confèrent les termes observationnels ; ils sont davantage qu'une simple collection d'énoncés observationnels et leur rôle ne se réduit pas à résumer des faits empiriques. C'est d'ailleurs toute leur utilité, s'ils doivent en avoir une : leur signification doit aller au-delà de celle que donnent les termes observationnels. Aussi, la signification des termes théoriques est donnée seulement de façon partielle par les termes observationnels.

Le fait que l'interprétation des termes théoriques soit partielle, du point de vue empirique, est en réalité une caractéristique fondamentale pour la recherche scientifique. Comme les termes théoriques peuvent signifier plus qu'un certain contenu empirique, ils peuvent servir à étendre ou à modifier la théorie. Le sens de la théorie n'est pas fixé définitivement et peut évoluer. Carnap l'exprime ainsi :

[8] Carnap (1956), p. 46.

[9] Cf. les références que donne Suppe (1977), p. 87. Des explications ultérieures sont données par Carnap (1956), p. 46 et (1966) p. 231 notamment. Hempel, l'autre figure centrale de la Conception Dominante, souscrit à cette notion d'interprétation partielle ou incomplète : cf. Hempel (1958) et (1963).

> « Cette interprétation [d'un terme théorique] est nécessairement incomplète. Pour cette raison, le système reste ouvert, de telle sorte qu'il est possible d'y ajouter de nouvelles règles de correspondance. »[10]

Carnap donne l'exemple des nouveaux protocoles expérimentaux qui peuvent être ajoutés pour mesurer des grandeurs physiques. On peut citer aussi le cas d'une nouvelle propriété qui est attribuée à une entité théorique, comme par exemple le spin de l'électron, découvert en 1925. Ajouter cette propriété revient à ajouter de nouvelles règles de correspondance pour le terme théorique d'électron. Si la signification des termes théoriques était entièrement donnée par les règles de correspondance initiales, il ne serait pas possible de conserver ces mêmes termes théoriques tout en leur ajoutant de nouvelles propriétés empiriques.

Une autre origine pour l'interprétation partielle de L_T se trouve dans les définitions implicites ou les contraintes qu'imposent les axiomes de T. Rappelons que ces axiomes ne sont composés que de termes théoriques et qu'ils n'ont donc pas d'interprétation empirique. Cependant, la forme même de ces axiomes fait que les termes théoriques qui s'y trouvent ne pourront pas recevoir n'importe quelle signification ou interprétation. Par exemple, le fait que dans la mécanique classique l'équation du mouvement s'écrive $\vec{f} = m\vec{a}$ impose des contraintes sur ce qui pourra être une force $\vec{f}$ ou une masse m. À cause d'une dissymétrie de l'équation vis-à-vis de ces deux termes, on ne peut pas les interchanger. De par sa place dans l'axiomatisation de la théorie, un terme théorique donné acquiert un certain rôle — par exemple, il est dans une certaine relation avec tel terme, mais pas avec tel autre. Aussi, la forme même des axiomes, bien qu'ils ne soient encore que des énoncés non-interprétés, contraint au moins partiellement l'interprétation possible des termes théoriques. La notion d'interprétation partielle a fait l'objet de critiques, notamment par Achinstein et Putnam[11], qui lui reprochent de ne pas pouvoir être définie correctement. À l'inverse, Suppe défend l'idée que la notion peut au contraire recevoir une définition cohérente[12].

Puisque l'interprétation empirique des termes théoriques n'est que partielle, selon la Conception Dominante, il est possible que ces termes théoriques puissent recevoir une interprétation additionnelle (qui peut être seulement non-empirique). Je vais à présent développer ce en quoi elle consiste. Il faut préciser tout d'abord que Car-

[10] Carnap (1973), p. 231.

[11] Pour une synthèse de leurs arguments, cf. Suppe (1977), p. 86-95, et (1971), qui en est une version plus riche.

[12] Cf. Suppe (1971). Il indique que cette défense ne revient pas à soutenir la Conception Dominante pour elle-même, mais qu'elle permet d'éclairer des caractéristiques importantes des théories scientifiques (Suppe, 1977, p. 57).

nap et Hempel n'insistent pas particulièrement sur cette notion d'interprétation non-empirique. S'ils l'admettent, c'est en ayant tendance à minimiser son importance[13]. Pour la Conception Dominante, l'interprétation non-observationnelle provient d'un méta-langage, c'est-à-dire d'un langage plus vaste que le langage L de la théorie (celui composé de L_O et L_T) permettant de parler de ce langage L (il doit permettre de spécifier sa syntaxe et les interprétations sémantiques de ses phrases). Un exemple de méta-langage est le langage scientifique naturel. C'est le sens qui est couramment attaché aux termes théoriques, dans le méta-langage, qui leur donne une signification en plus de celle, observationnelle, que les règles de correspondance expriment. Cette signification supplémentaire vient du fait que les termes théoriques ne sont pas de nouveaux mots, mais qu'ils étaient déjà employés dans le langage courant de la science : ils reprennent ainsi dans la théorie une partie du sens véhiculé par le terme du langage courant. Ce sens supplémentaire est indépendant de leur sens empirique et observable.

Suppe donne l'exemple suivant :

> « Alors les termes de V_T seraient interprétés comme référant à des électrons, des émissions d'électrons et ainsi de suite, où 'électron', 'émission d'électron', etc., ont leur signification normale dans le langage scientifique. Si nous regardons les termes théoriques tels que 'électron', nous trouvons que tandis qu'une partie du contenu conceptuel des concepts que ces termes expriment est observationnel (par exemple, les électrons sont des entités qui laissent des traces dans des chambres à bulles), une grande partie de la signification concerne des associations extra-observationnelles — par exemple, pour des électrons elle peut inclure diverses caractéristiques du modèle de boule de billard, diverses intuitions classiques à propos des masses ponctuelles macroscopiques, etc. De telles caractéristiques contribuent à la signification des termes théoriques dans le langage scientifique ordinaire et il est fort probable que sans elles peu de progrès scientifique pourrait être fait. »[14]

Dans ce passage, Suppe commence par préciser que l'interprétation non-empirique du langage L_T est de nature sémantique : les termes théoriques réfèrent aux entités considérées par le langage scientifique courant. Autrement dit, l'interprétation du langage courant fournit un domaine d'interprétation pour ces termes théoriques. Dans un second temps, Suppe précise la double origine de la signification des termes théoriques : observationnelle et non-observationnelle. Certaines caractéristiques de la

[13]Cf. Suppe (1977), note 191 p. 90 et note 212 p. 101.
[14]Suppe (1977), p. 91.

physique classique contribuent à la signification du second type. Suppe conclut sur les vertus pragmatiques de l'interprétation non-empirique : elle a souvent suggéré des idées pour la recherche.

Pour la Conception Dominante, l'interprétation non-empirique vient compléter l'interprétation empirique, mais elle en est indépendante. C'est-à-dire que l'interprétation non-empirique ne vient pas modifier ce qu'indiquent les règles de correspondance. Elle est compatible avec ces dernières et ne porte pas préjudice aux prédictions empiriques (parce qu'elle n'a aucun contenu empirique).

Suppe donne ensuite une reconstruction plus systématique de l'exemple précédent, à l'aide de la notion de modèle :

> « Les phrases L_T reçoivent une interprétation non-observationnelle indépendante en corrélant les termes V_T [i. e. le vocabulaire de L_T] avec les termes d'un langage scientifique naturel. Cette interprétation réalise deux choses. Premièrement, elle donne aux termes théoriques la signification attachée aux mots du langage scientifique naturel, modulo n'importe quelle altération qui serait imposée par l'acceptation de TC. Deuxièmement, elle fournit à L_T une interprétation sémantique de la forme suivante : elle spécifie un « monde » consistant en des entités théoriques et leurs attributs, et les termes de V_T sont interprétés comme référant à ou désignant certaines de ces entités ou attributs. Cette interprétation est telle qu'elle rend vraisemblablement T vraie et par conséquent est un *modèle* pour T. Ainsi, la doctrine de l'interprétation partielle conduit la version finale de la Conception Dominante (interprétée de manière réaliste) à ce qu'un modèle soit fourni pour les lois théoriques T d'une théorie. »[15]

Suppe s'appuie ici sur le concept technique de modèle, qui a été présenté pour l'interprétation en mathématiques, au chapitre 1, section 1 : un modèle d'une théorie consiste en une interprétation (sémantique) pour les termes de la théorie, dans laquelle la théorie est vraie[16]. Suppe indique que l'interprétation sémantique que fournit l'interprétation non-observationnelle revient à définir un monde, en en spécifiant les entités et les attributs. Cela n'est rien d'autre que dire qu'elle propose une interprétation au sens consensuel que je proposais au chapitre 1, section 2.4 : l'interprétation d'une théorie fournit l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie, en précisant les types d'objets et de propriétés que comporte ce monde.

Dans cette section, j'ai présenté la reconstruction de ce que Suppe nomme la Conception Dominante des théories scientifiques, autour des conceptions de Carnap

[15] Suppe (1977), p. 95-96.

[16] Cela suggère que les conceptions syntaxique et sémantique ne sont pas si éloignées l'une de l'autre.

et Hempel. Elle s'appuie sur la formulation axiomatique qui peut être donnée à une théorie, à l'aide d'un langage L, qui se compose d'un langage observationnel et d'un langage théorique. Les termes du second acquièrent toute leur signification empirique à l'aide de ceux du premier, grâce à ce qu'on appelle des règles de correspondance. Les termes théoriques reçoivent aussi une interprétation non-empirique, à l'aide du méta-langage que constitue le langage scientifique courant.

1.2 La Conception Dominante permet-elle de rendre compte de la théorie de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations ?

Je vais à présent examiner si la Conception Dominante, présentée dans la section précédente, est en mesure de rendre compte de la théorie de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations, présentées au chapitre précédent. Notons tout d'abord que la Conception Dominante, défendue jusque dans les années 60, n'a jamais vraiment été appliquée au cas de la mécanique quantique. Il est vrai que de nombreux auteurs ont mené une discussion, aujourd'hui classique, de ce que signifie par exemple le terme théorique d'« électron », qui est un terme quantique. Mais ils n'ont pas, à ma connaissance, discuté de la pluralité des interprétations que peut recevoir la mécanique quantique ; en tout cas, ils n'ont pas pu le faire pour la situation actuelle qui est étudiée dans cette thèse et notamment pour les décennies les plus récentes. Par conséquent, je dois moi-même proposer une façon dont la Conception Dominante peut s'appliquer à la mécanique quantique contemporaine et à sa pluralité d'interprétations. Je commence par proposer une première lecture possible (section 1.2.1), avant de montrer ses limites (section 1.2.2) ; je propose ensuite une autre lecture de la façon dont la Conception Dominante conçoit la mécanique quantique et je discute de ses problèmes (sections 1.2.3 à 1.2.4).

Comme indiqué préalablement, ma critique de la Conception Dominante ne porte que sur sa capacité à rendre compte de la mécanique quantique. Je ne reprends pas les arguments plus généraux qui ont été proposés. Ce faisant, je défendrai l'idée que la mécanique quantique a des raisons qui lui sont propres de ne pas être analysable selon la Conception Dominante.

1.2.1 Une hypothèse : la pluralité d'interprétations quantiques est une pluralité d'interprétations non-empiriques

Commençons par identifier ce qui, dans l'analyse de la Conception Dominante, correspond aux interprétations quantiques, telles qu'elles ont été présentées dans le

chapitre précédent. D'après la dernière citation de Suppe (plus haut p. 97), l'interprétation non-empirique des termes théoriques correspond exactement à la définition que j'avais donnée (chapitre 1, section 2.4) d'une interprétation au sens d'une image d'un monde, spécifiant des types d'objets et de propriétés qui peuplent le monde. D'après ce que j'ai montré au chapitre précédent, cette caractérisation rend effectivement compte des différentes interprétations quantiques. Par conséquent, si la reconstruction que propose Suppe est exacte, l'interprétation non-empirique de la Conception Dominante correspond à ce qui est appelé une « interprétation quantique » dans la littérature contemporaine. Ainsi, les termes théoriques tels que « fonction d'onde » ou « électron » et un énoncé comme l'équation de Schrödinger, sont employés par tous les physiciens ; selon l'interprétation quantique adoptée, ils recevront des interprétations non-empiriques différentes. Leur signification empirique, quant à elle, reste la même. La pluralité des interprétations quantiques n'est alors qu'une pluralité d'interprétations non-empiriques. Cela est cohérent avec l'équivalence empirique des interprétations quantiques[17] : elles n'ont que des conséquences non-empiriques. Ainsi, on en vient à supposer que le reste de la théorie de la mécanique quantique est commun pour toutes les interprétations : énoncés théoriques, langage, règles de correspondance ; seule l'interprétation non-empirique change selon l'interprétation quantique adoptée. Aussi, je vais considérer pour la suite l'hypothèse selon laquelle la Conception Dominante analyse la théorie de la mécanique quantique de la façon suivante : les interprétations quantiques (orthodoxe, bohmienne, everettienne...) sont des interprétations non-empiriques de la théorie (et il existe par ailleurs un seul langage L, une seule théorie T et des règles de correspondance C communes à toutes les interprétations). Autrement dit, l'hypothèse est que la pluralité des interprétations quantiques n'est qu'une pluralité d'interprétations non-empiriques, au sein d'une seule théorie. C'est cette hypothèse que je vais évaluer dans la section suivante ; je vais montrer qu'elle n'est pas tenable.

Notons dès à présent que cette hypothèse présente l'avantage de fournir une explication de l'existence de plusieurs interprétations d'une théorie. Considérons en effet une théorie T qui rend compte d'un certain ensemble de données expérimentales, à l'aide de règles de correspondance C. Selon la Conception Dominante, les règles C fournissent une signification empirique aux termes théoriques, mais cette signification n'est que partielle. Le sens non-empirique n'est pas déterminé (on parle de sous-détermination). Plusieurs interprétations non-empiriques différentes peuvent donc venir la compléter, tandis qu'elle conserve le même sens empirique. La pluralité

[17] Cf. chapitre 2, section 4.

des interprétations de la mécanique quantique en seraient un exemple. C'est à cause d'une sous-détermination, portant sur l'élément de l'interprétation non-empirique, qu'il peut exister plusieurs interprétations quantiques.

1.2.2 Problèmes rencontrés par cette hypothèse

L'hypothèse selon laquelle les interprétations quantiques correspondent à des interprétations non-empiriques doit faire face à un premier problème. Les tenants de la Conception Dominante, Carnap et Hempel en particulier, ont cherché à minimisé l'importance de cette interprétation non-empirique[18]. Par exemple, selon Hempel, une théorie qui ne serait que partiellement interprétée (c'est-à-dire qui n'aurait pas d'interprétation non-empirique) pourrait heureusement être comprise à l'aide des seules règles de correspondance[19]. La Conception Dominante ne place pas au premier plan l'interprétation non-empirique, qui est celle qui nous intéresse pour la mécanique quantique. C'est seulement la reconstruction bienveillante de Suppe[20] qui la reconstruit favorablement et de façon plus explicite.

Un deuxième problème, lié au précédent, concerne les règles de correspondance. Selon l'hypothèse considérée ici, les interprétations quantiques du chapitre précédent sont des interprétations non-empiriques qui partagent les mêmes règles de correspondance. Or le chapitre précédent a montré que les différentes interprétations quantiques ne partagent certainement pas les mêmes règles de correspondance. Elles proposent d'interpréter les prédictions probabilistes de façons très différentes. Selon l'interprétation orthodoxe, la prédiction concerne les résultats qui peuvent être lus sur des instruments macroscopiques. Selon l'interprétation de Bohm, l'objet de la prédiction ne peut être que des positions de particules (par exemple, la position d'une aiguille). Selon l'interprétation d'Everett enfin, les prédictions concernent non pas des « résultats de mesure », mais les paris que des agents rationnels peuvent accepter, préalablement à l'expérience.

Le problème précédent est en partie dû à un problème au niveau du langage observationnel. Comme l'objet des prédictions (et qui est observable) n'est pas le même selon les interprétations quantiques, cela signifie que les termes du langage observationnel ne sont pas les mêmes : on parle de « résultat de mesure d'une observable », de « position de particule » ou de « pari d'agent ». Les interprétations quantiques ne

[18] Cf. Suppe (1977), notamment note 191 p. 90 et note 212 p. 101.

[19] Cf. Hempel (1963), p. 696.

[20] J'ai indiqué qu'il a argumenté en faveur de la reconnaissance de l'interprétation non-empirique, au sein de la Conception Dominante : cf. ma note 12 p. 95.

s'appuient pas sur le même langage observationnel L_O.

Les interprétations quantiques s'appuient aussi sur des langages théoriques différents. J'ai indiqué au chapitre précédent qu'elles emploient des concepts et des formulations mathématiques différentes. Par exemple, l'interprétation orthodoxe contient le terme de « réduction » de la fonction d'onde ; l'interprétation bohmienne contient le terme d'« équation-pilote » et les nouvelles variables que sont les positions Q_k des particules ; l'interprétation everettienne parle de « mondes », d'« embranchement ». Ces termes théoriques n'ont pas de correspondant direct dans chacune des autres interprétations.

Un dernier élément change selon l'interprétation quantique adoptée : l'énoncé que prend la théorie de la mécanique quantique, ou son axiomatisation. Ainsi que je l'ai montré dans le chapitre précédent, les axiomatisations orthodoxe, bohmienne et everettienne de la mécanique quantique sont différentes (elles reposent d'ailleurs sur des termes théoriques différents). La première repose sur cinq postulats, comportant notamment le postulat de projection de la fonction d'onde. La mécanique bohmienne utilise quatre postulats, avec de nouvelles variables de positions, une nouvelle équation-pilote et un postulat sur la densité initiale des particules. L'axiomatisation everettienne refuse le postulat de projection orthodoxe.

Un dernier problème concerne la distinction observable-inobservable, qui est essentielle à la Conception Dominante. Selon l'hypothèse considérée ici, cette distinction doit être la même pour toutes les interprétations quantiques. Or j'ai indiqué que cela n'est pas le cas[21] : ce qui constitue un fait expérimental selon une interprétation quantique particulière n'en est pas nécessairement un pour une autre interprétation.

J'ai considéré jusqu'à présent l'hypothèse selon laquelle les interprétations quantiques sont des interprétations non-empiriques d'une même théorie. Or j'ai montré que tous les éléments de la théorie (langage, axiomatisation, règles de correspondance...) sont affectés par l'interprétation adoptée. Il me semble important de tirer la mesure de l'échec de l'hypothèse considérée jusqu'ici. La Conception Dominante proposait d'analyser les théories scientifiques de façon relativement complexe, en distinguant différents éléments indépendants : langages et méta-langages, interprétations empiriques et non-empiriques, axiomatisation, règles de correspondance, etc. L'intérêt de cette complexité était, semble-t-il, de pouvoir rendre compte de certaines subtilités des théories scientifiques. Par exemple, elle devrait pouvoir rendre compte de la pluralité d'interprétations de la mécanique quantique, en montrant qu'une interprétation non-empirique peut venir se rajouter de façon indépendante vis-à-vis de l'interpréta-

[21] Ce point a fait l'objet de la section 4.3 du chapitre précédent.

tion empirique. Mais en montrant que la Conception Dominante ne peut s'appliquer ainsi à la mécanique quantique, on vient ruiner le projet dans son ensemble. Cet échec n'est pas anecdotique : quel est l'intérêt de distinguer de nombreux éléments d'analyse, s'ils s'avèrent ne pas être indépendants les uns des autres ? Par exemple, j'ai montré que la distinction entre un langage observationnel et théorique et celle entre une interprétation empirique et non-empirique ne tiennent pas ; l'axiomatisation de la théorie et les règles de correspondance, de leur côté, dépendent elles aussi de l'interprétation quantique adoptée. Il semble que la Conception Dominante n'a pas identifié des éléments pertinents, indépendants et robustes.

1.2.3 Des théories différentes

Puisque tous les éléments d'analyse de la Conception Dominante (langage, axiomatisation, règles de correspondance, interprétation empirique et non-empirique) dépendent de l'interprétation quantique adoptée, il n'est pas possible de considérer la mécanique quantique comme étant *une seule* théorie. Il faut admettre que chaque interprétation quantique définit une nouvelle théorie au sens de la Conception Dominante. C'est cette hypothèse que je veux examiner à présent, afin de juger si la Conception Dominante rend compte correctement de la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. L'avantage de cette hypothèse est le suivant. J'ai indiqué dans le chapitre précédent qu'il existe pour chaque interprétation quantique une formulation mathématique particulière de la théorie, qui lui est associée de façon naturelle. La Conception Dominante est en mesure de souligner ce lien privilégié, parce qu'elle s'intéresse à la formulation linguistique d'une théorie, en la définissant à travers un langage particulier (ce qui lui vaut d'être généralement qualifiée de « conception syntaxique » des théories). En demandant qu'une théorie soit énoncée sous une formulation axiomatique, cela lui permet d'insister sur la *formulation mathématique* que prend la théorie, et donc en l'occurence celle qui est attachée à une interprétation particulière.

La Conception Dominante, à travers cette hypothèse selon laquelle les interprétations quantiques définissent des théories différentes, est-elle en mesure de rendre compte de façon satisfaisante de la mécanique quantique ? J'ai indiqué dans l'introduction de ce chapitre que trois critères sont particulièrement importants. L'analyse proposée doit permettre 1) de rendre compte de l'unité théorique de la mécanique quantique, 2) d'expliquer la pluralité des interprétations et 3) de rendre compte de l'équivalence empirique entre les interprétations.

Concernant le premier point, on note que les interprétations quantiques sont simplement re-baptisées « théories ». Cela pourrait n'être qu'un problème terminologique et définitionnel, donc insignifiant, mais cela traduit en réalité le fait qu'il n'y a plus grand chose de commun entre toutes ces interprétations ou théories, selon la Conception Dominante. Ni le langage, ni les règles de correspondance, ni les axiomes, ni l'interprétation, etc., ne sont identiques pour toutes les théories quantiques. Seuls certains énoncés (par exemple l'équation de Schrödinger) restent partagés, mais sans avoir la même signification. La Conception Dominante perd ainsi l'unité théorique entre les interprétations quantiques. Un autre inconvénient pour la position de la Conception Dominante est que ses éléments d'analyse (langages, énoncés, règles de correspondance, etc.) ne sont pas aussi indépendants qu'elle veut bien le prétendre. Ce problème n'a pas été réglé en définissant de nouvelles théories pour chacune des interprétations.

L'explication de la pluralité des interprétations quantiques est aussi moins bonne avec cette nouvelle lecture de la Conception Dominante. L'hypothèse considérée précédemment avait l'avantage de faire que les interprétations quantiques, en tant qu'interprétations non-empiriques, étaient sous-déterminées par l'interprétation empirique de la théorie : comme l'interprétation empirique ne pouvait les départager, on expliquait la pluralité des interprétations quantiques. À présent que les interprétations quantiques définissent des théories à part entière, la seule explication pour leur pluralité est la sous-détermination des théories par l'expérience (disant qu'il existe une infinité de théories possibles pouvant rendre compte d'un même ensemble de données expérimentales). Le type de sous-détermination change : auparavant, seule l'interprétation non-empirique (c'est-à-dire une partie seulement de la théorie) était sous-déterminée ; à présent, c'est l'ensemble de la théorie qui est sous-déterminé, de sorte qu'il y a plusieurs théories quantiques (orthodoxe, bohmienne, everettienne). Cela revient à considérer que ce qui est sous-déterminé est beaucoup plus vaste. La sous-détermination est ainsi moins spécifique et les multiples théories quantiques sont traitées comme le seraient n'importe quelles théories différentes qui seraient empiriquement équivalentes. L'origine commune et l'unité théorique des interprétations quantiques n'est plus mise en valeur. Le troisième critère, concernant l'équivalence empirique, est traité dans la section suivante.

1.2.4 L'équivalence empirique

Une des principales critiques adressées à la Conception Dominante, et plus généralement à la conception syntaxique des théories, est qu'elle ne fournit pas une bonne notion de l'équivalence empirique entre des théories scientifiques différentes. Van Fraassen écrit ainsi :

> « Nous avons besoin de rendre compte [des concepts d'adéquation empirique et d'équivalence] en général. C'est ici que l'approche syntaxique a le plus ostensiblement été essayée et qu'elle a le plus ostensiblement échoué. »[22]

Van Fraassen dit même que la simple notion d'adéquation empirique, entre *une* théorie et l'expérience, n'est pas satisfaisante dans la conception syntaxique. Il semble alors logique que la notion d'équivalence entre théories, plus complexe, soit encore moins satisfaisante. Pourquoi la Conception Dominante échoue-t-elle ici ?

Commençons par rappeler qu'elle conçoit une théorie comme un ensemble d'énoncés : à partir des axiomes de la théorie, des théorèmes peuvent être déduits, dans un langage particulier. Le contenu prédictif d'une théorie consiste en ses conséquences observables, c'est-à-dire en ses théorèmes exprimés dans le langage observationnel (appelons cet ensemble T/L_O). Pour la Conception Dominante, deux théories sont empiriquement équivalentes si elles ont les mêmes conséquences observables, c'est-à-dire le même ensemble T/L_O d'énoncés exprimés dans un même langage observationnel.

Un premier problème pour cette notion d'équivalence est qu'elle achoppe sur les termes théoriques[23]. Considérons deux théories T et T', que les scientifiques considèrent comme empiriquement équivalentes. Ces théories sont différentes et postulent l'existence d'entités théoriques différentes. En référence à l'une de ces entités théoriques, T peut dire « il existe quelque chose qui a telles propriétés observables », alors que T', qui considère d'autres entités théoriques, ne peut souscrire à cette phrase. Comme la phrase en question est exprimée avec des termes observationnels, elle appartient à T/L_O. En revanche, elle n'est pas dans T'/L_O. Cela suffit à montrer que T/L_O et T'/L_O ne sont pas identiques : la Conception Dominante échoue à déclarer les deux théories T et T' « empiriquement équivalentes ». De façon générale, des théories qui postulent des entités théoriques différentes ne pourront pas être déclarées empiriquement équivalentes par la Conception Dominante. Celle-ci n'a pas une conception satisfaisante de l'équivalence empirique. Le problème a pour origine le fait

[22] Van Fraassen (1980), p. 53.
[23] Ce point est repris de van Fraassen (1980), p. 55.

qu'elle considère une théorie comme une entité linguistique et qu'elle distingue entre un langage observationnel et théorique.

Un second problème concerne plus spécifiquement la mécanique quantique et a à voir avec la notion de langage observationnel. Les interprétations quantiques reconnaissent des faits expérimentaux différents et s'appuient sur des langages observationnels différents. Par conséquent, T/L_O et T'/L'_O ne s'expriment pas dans le même langage observationnel et ne peuvent pas être directement comparés. Pour définir l'équivalence empirique entre les théories T et T', il est nécessaire de procéder préalablement à une traduction, d'un langage observationnel à un autre. Cela entraîne la Conception Dominante vers les problèmes liés à la traduction de manière générale ; je ne les aborde pas ici. La mécanique quantique montre en tout cas qu'il n'existe pas *un* langage observationnel unique et neutre, puisque les interprétations quantiques en utilisent de nouveaux. Cela indique l'échec du projet de la Conception Dominante, qui souhaitait ramener l'expression des théories à un langage observationnel unique et neutre. Aussi, la base sur laquelle elle voulait fonder l'équivalence empirique se dérobe.

Ainsi, la Conception Dominante ne propose pas une conception satisfaisante de l'équivalence empirique. C'est un problème réellement majeur pour elle qui voulait s'appliquer au cas de la mécanique quantique, dans la mesure où elle reconnaît autant de théories que d'interprétations quantiques (orthodoxe, bohmienne, everettienne, etc.), mais n'est pas en mesure d'établir leur équivalence empirique.

1.2.5 Conclusion concernant la Conception Dominante

Dans cette section 1.2, j'ai considéré tout d'abord une première lecture possible de la façon dont la Conception Dominante s'applique au cas de la mécanique quantique. Elle consiste à considérer que la pluralité des interprétations quantiques est une pluralité d'interprétations non-empiriques, tandis que tout le reste de la théorie (langage, axiomatisation, règles de correspondance, interprétation empirique...) sont communs. J'ai donné de nombreux arguments montrant que cette position n'est pas tenable. J'ai alors considéré une autre lecture de la Conception Dominante : les interprétations quantiques définissent des théories différentes. Cette lecture est cohérente et c'est ainsi que la Conception Dominante doit considérer la mécanique quantique. Cependant, elle échoue à rendre compte de façon satisfaisante de la situation en mécanique quantique, notamment de l'équivalence empirique entre les interprétations (ou théories) quantiques. La conclusion générale est que la Conception Dominante de

Carnap et Hempel n'est pas une façon satisfaisante d'analyser la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations. Dans la section suivante, je vais considérer une variante de la Conception Dominante, due à Nagel, qui pourrait apporter certaines améliorations.

1.3 Présentation de la conception de Nagel

Le courant des empiristes logiques, qui cherche à reconstruire formellement les théories scientifiques en isolant leur signification cognitive, ne se limite pas à Hempel et Carnap, même si ceux-ci en sont ses plus illustres défenseurs. Ernest Nagel, dans son ouvrage *The Structure of Science* (1961), notamment dans son chapitre 5, défend une conception des théories scientifiques qui se rattache à ce courant. Par rapport à la Conception Dominante que je viens de discuter, Nagel apporte néanmoins certaines modifications. En particulier, il se démarque sur la question de l'interprétation de la théorie et il insiste sur l'importance des « modèles » dans les théories scientifiques. Cela lui permet-il d'échapper à certaines critiques qui ont été adressées à la Conception Dominante et de proposer ainsi une analyse tenable de la mécanique quantique ? C'est ce que je veux examiner à présent. Cette section 1.3 présente la position de Nagel[24], tandis que la suivante analysera de façon critique son application au cas de la mécanique quantique.

Voici comment Nagel propose d'analyser la structure des théories scientifiques :

> « Pour les besoins de l'analyse, il sera utile de distinguer trois composantes dans une théorie : (1) un système formel abstrait qui est le squelette logique du système explicatif et qui « définit implicitement » les notions de base du système ; (2) un ensemble de règles qui assignent en effet un contenu empirique au système formel abstrait en le reliant aux objets concrets de l'observation et de l'expérience ; et (3) une interprétation ou modèle pour le système formel abstrait, qui fournit de la chair à la structure du squelette à l'aide d'une étoffe conceptuelle ou visualisable plus ou moins familière. »[25]

Dans cette description, nous retrouvons tout d'abord en (1) ce que la Conception Dominante nomme la théorie T, c'est-à-dire un ensemble d'énoncés dans un langage formel et non-interprété. Ainsi qu'on l'avait noté, la structure générale de T impose certaines contraintes et fournit une interprétation (ou définition) implicite

[24] Je m'appuie sur Nagel (1961) et aussi sur les commentaires de Suppe (1977) et Vorms (2009).
[25] Nagel (1961), p. 90.

pour les termes du langage employé (ou « notions de base »)[26]. La deuxième composante de l'analyse de Nagel n'est rien d'autre que les règles de correspondance C, qui permettent de donner une signification empirique au langage. Dans la Conception Dominante, cette notion repose sur la distinction entre des termes observationnels (auxquels ces règles donnent une signification) et des termes théoriques. Même si Nagel ne rappelle pas ici cette distinction, il l'a défend explicitement plus tôt[27] et son analyse repose dessus. Jusque-là, Nagel reste fidèle aux thèses de la Conception Dominante ; c'est seulement dans la troisième composante qu'il s'en écarte.

La dernière composante est présentée comme une « interprétation ou un modèle » (ces termes sont utilisés de manière interchangeable par Nagel). Le terme de « modèle » est employé ici par Nagel dans au moins deux sens, de façon concomitante. Le premier est le sens logique, celui que j'ai toujours employé jusqu'ici : un modèle consiste en une structure qui rend vraie la théorie formelle ; il fournit une interprétation sémantique, au sens de la théorie des modèles. Donner un modèle consiste alors à fournir une liste d'éléments (ou d'entités) caractérisées par certaines propriétés et relations[28]. Le terme de « modèle » prend aussi un second sens pour Nagel. Il désigne un système qui présente des similarités, ou analogies — plus formellement, des isomorphismes de structure — avec ce qu'il modélise. Ce système peut être concret, comme dans le cas d'une maquette d'avion qui se veut un modèle pour un avion original, ou imaginé, comme dans le cas des boules de billard qui modélisent les atomes d'un gaz (s'intéressant aux théories scientifiques, Nagel ne considère que les systèmes imaginés et abstraits). Comme un modèle sert à représenter un système grâce à certaines ressemblances, Suppe propose de qualifier ce second sens de modèle chez Nagel de « modèle iconique »[29]. Selon Nagel, le modèle iconique a une fonction de représentation, c'est-à-dire que grâce à lui « au moins une partie du contenu [des énoncés de la théorie] peut être imaginée visuellement »[30]. Cela est possible car la théorie se présente « à l'aide de notions relativement familières ». Ainsi, une signification est apportée à la théorie à travers sa composante (3), d'une part grâce à la signification habituelle de ces notions et d'autre part grâce à la visualisation que le modèle permet.

On retrouve ici une idée proche de celle de la Conception Dominante. Rappelons que pour cette dernière, une signification supplémentaire (non-empirique) est apportée aux termes théoriques au moyen d'un méta-langage plus riche, par exemple le langage

[26]Cf. des développements de Nagel (1961), p. 91 et 300.
[27]Cf. Nagel (1961), chapitre 5.
[28]Nagel défend par exemple ce sens de « modèle » dans la note 4, p. 96.
[29]Suppe (1977), p. 97.
[30]Nagel (1961), p. 95.

scientifique ordinaire. L'interprétation non-empirique de la Conception Dominante équivaut chez Nagel à l'interprétation ou le modèle (3). Pour Nagel, ce sont aussi des termes familiers qui apportent une signification aux termes de la théorie[31]. Il insiste cependant, et c'est une différence majeure avec la Conception Dominante, sur l'aspect visuel de ces modèles (je reviens sur ce point plus bas). Surtout, il requiert que cette signification prenne la forme d'une interprétation sémantique, à travers un certain matériau, conceptuel ou visuel, qui serve de modèle pour la théorie formelle. Là où la Conception Dominante voit une connection lâche (et peut-être superflue) entre la théorie et les concepts du langage courant, Nagel insiste sur l'indispensabilité du modèle iconique et sur le fait que ce modèle doive définir par lui-même un système rendant vraie la théorie formelle. Soulignons aussi que l'interprétation non-empirique (3) et l'interprétation empirique par les règles de correspondance sont encore plus indépendantes chez Nagel. Pour ce dernier, l'interprétation (3) ne vient pas seulement compléter l'interprétation empirique et en combler les lacunes de signification. Au contraire, elle est définie à part, de façon autonome, sans être définie par rapport à l'interprétation empirique[32]. La priorité n'est pas donnée à l'interprétation empirique. À l'inverse, le fait de fournir un modèle iconique (3) pour une théorie ne spécifie pas l'interprétation empirique de cette théorie, c'est-à-dire les règles de correspondance (2)[33]. Il y a ici une indépendance entre les composantes (2) et (3). Nagel insiste ainsi d'ailleurs sur l'indépendance des trois composantes de la théorie qu'il distingue et qui est encore plus marquée que pour la Conception Dominante.

Une précision doit être apportée concernant le fait que le modèle nagelien doit être « visualisable ». Cela veut-il dire que tout modèle doit consister en un système qui puisse être imaginé visuellement par notre esprit ? L'exigence de Nagel n'est en réalité pas aussi forte. Il n'exige pas que tout le système puisse être visualisé ; il veut seulement que des éléments visualisables soient employés dans le modèle. Il dit ainsi que le modèle doit être « au moins en partie [...] imaginé visuellement »[34], sous-entendant qu'il n'a pas besoin de l'être en totalité. Par exemple, le modèle peut s'appuyer sur certaines images familières et visualisables et néanmoins ne pas se réduire à elles. Nagel prend l'exemple de la mécanique quantique et en particulier la notion d'électron. Avec l'interprétation orthodoxe, la description de l'électron se fait de façon complé-

[31]Selon la lecture de Nagel que propose Suppe (1977, p. 95 note 1), les termes du modèle ne constituent pas un méta-langage plus riche, comme l'exige la Conception Dominante. Il y a ainsi, pour Suppe, un écart plus important entre cette dernière et la position de Nagel.

[32]Elle doit simplement être compatible avec l'interprétation implicite qui découle des postulats de la théorie. Cf. Nagel (1961), p. 91 et 300.

[33]Cf. Nagel (1961), p. 97.

[34]Nagel (1961), p. 95.

mentaire comme une onde et comme une particule, selon le contexte expérimental. Nagel écrit à ce propos :

> « les mots comme 'onde' ou 'particule' utilisés pour décrire [le modèle] sont employés d'une manière analogique. [...] On dit qu'un électron est une particule (ou bien une onde) parce que certaines des propriétés attribuées aux électrons sont analogues à certaines propriétés associées aux particules classiques, ou respectivement aux ondes sur l'eau qui nous sont familières, même si l'analogie échoue concernant d'autres propriétés. »[35]

Pour Nagel, le fait que certaines propriétés seulement soient semblables suffit pour légitimer un modèle et considérer qu'il est visualisable. Le modèle complémentaire de l'électron n'est pas visualisable en tant que tel dans son ensemble, mais cela ne l'empêche pas d'être considéré par Nagel comme étant « en partie visualisable ».

1.4 La conception de Nagel permet-elle de rendre compte de la pluralité des interprétations quantiques ?

Je vais à présent voir si la conception nagelienne des théories scientifiques est en mesure de rendre compte de la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. On a vu que Nagel se différencie de façon assez nette de la Conception Dominante sur la notion d'interprétation. Par conséquent, il pourrait être mieux placé que celle-ci pour rendre compte d'une situation de pluralité d'interprétations comme en mécanique quantique.

Commençons par préciser comment l'analyse de Nagel s'applique à la mécanique quantique. Dans son livre de 1961, Nagel traite de la mécanique quantique dans son chapitre 10, mais sans aborder la pluralité des interprétations que j'étudie ici (orthodoxe, bohmienne, everettienne)[36]. Il évoque cependant ailleurs que la mécanique quantique peut recevoir différentes interprétations. Par exemple, dans un article de 1945 à propos d'un ouvrage de Reichenbach, Nagel parle du

> « problème d'interpréter le formalisme de la mécanique quantique — c'est-à-dire de spécifier un modèle sub-atomique convenable dont le comportement satisfait les postulats de la théorie quantique. »[37]

[35] Nagel (1961), p. 144-145.

[36] Temporellement, cela aurait été possible, puisque Bohm a proposé son interprétation en 1952 et Everett en 1957, mais elles étaient passées plutôt inaperçues et ne constituaient pas en 1961 un sujet d'étude classique.

[37] Nagel (1945), p. 439.

Il semble ici que Nagel a déjà adopté le sens d'« interprétation » ou de « modèle » qu'il défendra en 1961 : interpréter une théorie, c'est spécifier un système qui rend vrai les axiomes de la théorie. En ce sens, Nagel parle aussi de « plusieurs interprétations alternatives de ce formalisme mathématique »[38]. Cela suggère que Nagel analyse la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations de la façon suivante : les interprétations quantiques ne sont rien d'autre que des « modèles ou interprétations » (la troisième composante qu'il distingue dans une théorie)[39] ; le reste de la théorie (système formel et règles de correspondance) sont communes à toutes les interprétations. Selon cette lecture, la pluralité d'interprétations quantiques est une pluralité de la seule composante (3).

Considérons d'abord une objection proposée par Suppe. Dans sa discussion de la position de Nagel[40], Suppe objecte que la conception d'interprétation ou de modèle de Nagel ne s'applique pas correctement à la mécanique quantique. Selon lui, la cause en est l'exigence que le modèle soit visualisable ou exprimé avec des concepts familiers. Il est bien connu, dit-il, que la mécanique quantique n'est pas compatible avec les concepts classiques familiers. On pourrait ajouter qu'un des principes méthodologiques de Heisenberg, dans son travail en mécanique quantique, était précisément d'« éviter l'usage des images visualisables »[41]. Il me semble cependant que l'argument de Suppe repose sur une lecture trop stricte de Nagel. Ce dernier a insisté sur le fait que les concepts familiers ou visualisables pouvaient n'être employés que par morceaux, pour une partie du modèle — comme l'a montré la discussion à propos de la complémentarité du modèle de l'électron. Si on admet cela, il semble qu'il soit possible de sauver la position de Nagel et de l'appliquer à la mécanique quantique. En tout cas, j'aurai ici cette lecture charitable envers Nagel. Je vais critiquer sa position pour bien d'autres problèmes qu'elle rencontre.

Comme la conception de Nagel se rapproche de la Conception Dominante sur un certain nombre de points, je vais mener la discussion de la position de Nagel en m'appuyant sur celle que j'ai eue à la section 1.2.2. La première critique que j'ai adressée à la Conception Dominante concerne le fait qu'elle tente de minimiser l'importance de l'interprétation non-empirique des théories. Cette critique ne peut être faite à Nagel : il prend là le contre-pied de Carnap ou de Hempel en insistant sur le rôle de l'interprétation ou du modèle, dont il fait une composante à part entière (3). En revanche, toutes les autres critiques s'appliquent à Nagel de la même façon. Prenons

[38] Nagel (1945), p. 438.
[39] Cf. plus haut, la citation 25 p. 25.
[40] Suppe (1977), p. 98.
[41] Cf. Hilgevoord et Uffink (2011), section 2.1.

tout d'abord, les règles de correspondance (sa composante 2). J'ai montré qu'en mécanique quantique elles dépendent de l'interprétation quantique considérée. Il n'est pas vrai, comme le soutient Nagel, qu'elles soient indépendantes de l'interprétation quantique (la composante 3). L'échec de Nagel est peut-être encore plus dur que pour la Conception Dominante, dans la mesure où il a insisté davantage sur l'indépendance entre l'interprétation et les règles de correspondance. Les autres éléments sur lesquels s'appuie l'analyse de Nagel — langage observationnel, langage théorique, axiomatisation — dépendent eux aussi de l'interprétation quantique adoptée, pour les mêmes raisons que pour la Conception Dominante. De façon plus générale, les composantes (1) et (2) que Nagel distingue dépendent toutes deux directement de (3), c'est-à-dire de l'interprétation quantique considérée. Enfin, le problème de la distinction entre observable et inobservable est reconduit à l'identique chez Nagel.

La conclusion est qu'il n'est pas possible pour Nagel de considérer la pluralité d'interprétations quantiques comme une simple pluralité de sa composante (3), l'interprétation ou le modèle. Nagel est donc contraint, comme l'a été la Conception Dominante, de reconnaître que les interprétations quantiques définissent autant de théories différentes. Il échoue donc à mettre en évidence l'unité théorique de la mécanique quantique. Ayant reconnu plusieurs théories différentes, Nagel se retrouve face à la même critique que la Conception Dominante pour ce qui est de la notion d'équivalence empirique. Je renvoie à la discussion menée à ce moment, p. 104 et suivantes.

L'échec de Nagel à rendre compte de façon satisfaisante de la situation en mécanique quantique est particulièrement regrettable, car il a entièrement revisité la notion d'interprétation non-empirique de la Conception Dominante, avec la notion de modèle iconique. La cause de l'échec peut certainement être imputée à tout ce que Nagel n'a pas modifié : le découpage entre un formalisme non-interprété, des interprétations empirique et non-empirique. Et peut-être, surtout, un présupposé méthodologique qui consiste à adopter une conception syntaxique des théories, avec une attention à la formulation linguistique des théories et à leur langage.

Conclusion

Dans cette section 1, j'ai étudié dans quelle mesure la conception syntaxique des théories est en mesure de rendre compte de la situation contemporaine de la mécanique quantique. Pour cela, j'ai distingué deux versions : d'une part ce qui peut être reconstruit comme la Conception Dominante, défendue par Hempel et Carnap

et d'autre part la conception de Nagel. Face aux échecs de ces représentants les plus connus de la conception syntaxique, il apparaît urgent d'envisager ce que d'autres conceptions philosophiques des théories scientifiques peuvent proposer. Dans la section suivante, j'étudie la conception dite sémantique des théories scientifiques qui a été proposée pour pallier les carrences de la conception syntaxique et qui devait devenir la « nouvelle orthodoxie »[42].

2 Les interprétations quantiques selon la conception sémantique des théories

Dans cette section, j'étudie dans quelle mesure une autre conception des théories scientifiques, communément appelée la conception sémantique, permet de mieux rendre compte du cas de la mécanique quantique. Elle considère les théories comme des collections de modèles, sans s'attacher à la forme particulière (et langagière) que prennent les axiomes. Cette conception recouvre des positions parfois distinctes, défendues par des auteurs tels que Suppes, Suppe, van Frassen ou Giere.

Puisque je m'intéresse ici au cas de la mécanique quantique, je vais me limiter essentiellement à la version de la conception sémantique défendue par deux auteurs. Le premier est van Fraassen, qui a traité explicitement du cas de la mécanique quantique[43]. Je m'appuie aussi sur la position défendue par Hughes dans son manuel de philosophie de la mécanique quantique (Hughes, 1989) et qui se revendique de la conception sémantique des théories[44]. Je vais reconstruire une « conception sémantique » à partir des positions de van Fraassen et de Hughes. Comme pour ma présentation de la conception syntaxique dans la section 1.1, je ne prétends pas d'approfondir la position de ces auteurs, mais plutôt adopter une position médiane. Je m'appuie en outre sur les commentaires de Suppe (1977), chap. V-C. En discutant de la conception sémantique, mon objectif n'est pas de mener une étude exhaustive de ses qualités et faiblesses ; je vais seulement m'intéresser à sa capacité à rendre compte de la mécanique quantique et de ses multiples interprétations. L'organisation de cette

[42]Selon l'expression proposée par Le Bihan (2006).

[43]Van Fraassen énonce sa position générale dans (1970, 1976) ; il l'applique au cas de la mécanique dans (1970), (1980) chapitre 3, (1991).

[44]Hughes écrit en effet : « La conception générale des théories scientifiques qui sert de toile de fond à ces discussions précises de la théorie quantique est la conception sémantique associée à Patrick Suppes et Bas van Fraassen : les théories sont considérées comme fournissant des modèles pour les phénomènes dont elles traitent. » (Hughes, 1989, p. xii). D'autres affirmations similaires se trouvent p. 80, 175, 257.

section est la suivante : je vais commencer par présenter la conception sémantique (section 2.1), avant de discuter si elle est en mesure de rendre compte de la situation en mécanique quantique (section 2.2).

2.1 Présentation de la conception sémantique des théories

2.1.1 Introduction

Pour introduire l'idée générale de la conception sémantique, il peut être utile de la comparer, comme le fait van Fraassen, à la conception syntaxique étudiée précédemment :

> « La conception syntaxique d'une théorie l'identifie avec un ensemble de théorèmes, énoncés dans un langage particulier choisi pour l'expression de cette théorie. Cela devrait être contrasté avec l'alternative consistant à présenter une théorie dans un premier temps en identifiant une classe de structures comme étant ses modèles. Dans cette seconde approche, sémantique, le langage utilisé pour exprimer la théorie n'est ni fondamental ni unique ; la même classe de structures pourrait tout à fait être décrite de manières radicalement différentes, chacune avec ses propres limitations. Le modèle occupe le devant de la scène. »[45]

Van Fraassen commence par rappeler que, selon la conception syntaxique, une théorie s'énonce avec un langage particulier (dont nous avons vu notamment qu'il se compose de langages observationnel et théorique). À l'opposé, la conception sémantique ne particularise pas de langage particulier. Comment peut-elle alors présenter les énoncés de la théorie ? En fait, elle ne présente pas la théorie à travers des énoncés, mais à travers des modèles, qui ne sont pas des entités linguistiques. Le sens de modèle auquel van Fraassen fait référence est celui, logico-mathématique, qui a été présenté au chapitre 1, section 1 : un modèle est une structure d'interprétation (la donnée d'individus dans un domaine D) dans laquelle les axiomes de la théorie sont vrais. Puisque van Fraassen ne définit pas la théorie par ses axiomes, quels sont les axiomes que les modèles doivent rendre vrais ? Disons tout de suite qu'il n'existe pas un unique groupe d'axiomes et qu'il peut en exister plusieurs, tout aussi acceptables. En effet, la classe des modèles qui définit la théorie peut rendre simultanément vraies différentes axiomatisations, éventuellement exprimées dans des langages différents.

[45] Van Fraassen (1980), p. 44. Cité par Hughes (1989), p. 80.

Prenons un exemple simple, avec la théorie donnée par l'axiome suivant : « Pour des corps x et y de volume V_x et V_y, la réunion matérielle de x et y en un corps z a le volume $V_z = V_x + V_y$. » Un modèle de cette théorie se compose du couple {eau, huile}, dans des volumes quelconques, car un mélange eau-huile (qui n'est d'ailleurs pas miscible) aura un volume égal à la somme des volumes des liquides séparés. En revanche, le couple {eau, éthanol} ne constitue pas un modèle de cette théorie, car le volume du mélange est plus petit que la somme des volumes, en raison d'arrangements moléculaires particuliers. De façon générale, considérons l'ensemble des couples de corps qui ont la propriété requise : elle définit la classe des modèles de la théorie. Considérons à présent la théorie suivante : « Le volume de la réunion matérielle de deux corps vaut la somme des volumes de ces corps lorsque ceux-ci sont séparés. » Syntaxiquement, il est assez clair que cet axiome est différent du précédent (c'est pourquoi on dit parfois qu'il s'agit de théories différentes, au sens syntaxique du terme). Intuitivement, on comprend malgré tout que cet axiome est équivalent au premier, en un certain sens. La conception sémantique permet de préciser ce sens : c'est exactement la même classe de modèles qui rendent vrais ces axiomes. Par exemple, la structure {eau, huile} est un modèle pour les deux axiomes, tandis que celle {eau, éthanol} n'est un modèle pour aucun des deux. Comme la classe des modèles qui rendent vrais les deux axiomes est la même, la conception sémantique considère que ces axiomes définissent la même théorie. Celle-ci peut être présentée, au choix, par l'un ou l'autre de ces axiomes, mais aucun n'est plus légitime que l'autre (néanmoins, l'un peut avoir des avantages, par exemple d'ordre pratique, que l'autre n'a pas). Selon la conception sémantique, les théories sont des entités extra-linguistiques, qui peuvent être présentées avec des formulations linguistiques différentes. Ce sont les modèles, et non les axiomes, qui sont considérés comme premiers.

2.1.2 Modèles et phénomènes

L'exemple précédent de ce que peut être une théorie et ses modèles était très simple. Aujourd'hui, les théories modernes en physique emploient des outils mathématiques assez complexes et établir leur adéquation empirique s'avère assez subtil. Je vais indiquer le schéma général de la conception sémantique.

Considérons une théorie comme la mécanique classique, dont j'ai donné les axiomes dans la formulation newtonienne au chapitre 1, section 2.1. Dans cette théorie, un système comme une masse ponctuelle est représentée par deux vecteurs : un vecteur position $\vec{r}$ et un vecteur impulsion $\vec{p}$ (qui vaut, dans les cas simples, le produit de

la masse par la vitesse). La donnée de ces deux vecteurs constitue ce qu'on nomme l'« état » du système. Ces deux vecteurs, chacun à trois dimensions, sont définis par 6 coordonnées : ils peuvent être représentés par un point dans un espace à 6 dimensions, dit « espace des phases » (pour un système à N masses ponctuelles, cet espace a $6N$ dimensions). Au cours du temps, le point qui représente le système évolue dans l'espace des phases, définissant une trajectoire : celle-ci représente le comportement du système. Dans le cas simple d'un corps qui avance à vitesse constante v sur un axe x, le problème se limite à une dimension et l'espace des phases à 2 dimensions. Sa trajectoire de phase est représentée figure 3.1 : il s'agit d'une ligne horizontale car la vitesse, donc l'impulsion, est constante.

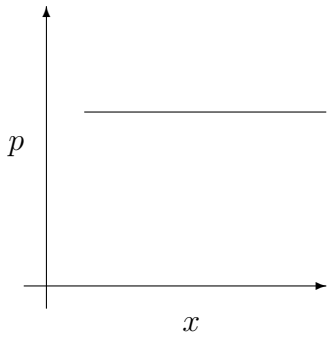

FIGURE 3.1 – Un exemple de trajectoire de phase en mécanique classique : le cas d'une particule se déplaçant à vitesse constante selon un axe x.

Considérons à présent le phénomène qui consiste à lancer un mobile monté sur coussin d'air (dans le but de réduire les frottements) sur un plan horizontal, avec une vitesse initiale donnée, et qui conserve par conséquent une vitesse à peu près constante. Une idée intuitive est que ce phénomène peut être représenté par la trajectoire de la figure 3.1. La conception sémantique permet de préciser comment le lien peut être fait. Ce n'est pas le phénomène empirique lui-même qui est directement associé à des nombres mathématiques. On définit tout d'abord un *système physique*, qui est une idéalisation du phénomène (c'est généralement ce que les scientifiques appellent un « modèle » du phénomène). Ce système physique est défini en ne retenant que certains paramètres du phénomène, qui ont une influence, et en en négligeant d'autres. La description du système physique se fait dans les termes de la théorie — avec ses paramètres et ses éléments fictionnels. Dans l'exemple étudié, le système physique consiste en une masse ponctuelle, soumise à une somme des forces nulle et se déplaçant à vitesse constante le long d'un axe x. L'idéalisation consiste notamment à considérer le mobile comme un point, à ne tenir compte d'aucun frottement,

à supposer le plan parfaitement horizontal et le mouvement selon un axe rectiligne.

C'est ce système physique, qui consiste en une idéalisation du phénomène empirique, qui est ensuite représenté par un modèle. Pour van Fraassen, ce modèle est une structure mathématique[46] : elle appartient à un espace mathématique, appelé l'espace des états. Un point de l'espace des états représente la configuration du système physique à un instant donné ; au cours du temps, l'état du système définit une trajectoire dans cet espace. La structure mathématique est l'ensemble des trajectoires possibles dans l'espace des états. Pour d'autres auteurs, ce modèle n'est pas seulement une structure mathématique, mais recouvre aussi certaines descriptions, équations, ainsi qu'une liste d'entités pour l'interpréter. Le terme de « modèle » est polysémique : la structure mathématique proposée est un modèle en deux sens du terme. Le premier est le sens mathématique : cette structure satisfait les axiomes de la théorie. C'est-à-dire que le point (ou la trajectoire) dans l'espace des états qui représente le système a des coordonnées qui rendent vraie la théorie. Une autre façon de comprendre ce sens est la suivante : l'espace des états est construit à partir des paramètres que la théorie manipule ; dans cet espace, toutes les trajectoires ne sont pas permises par la théorie, qui impose des contraintes. Dire qu'un modèle satisfait la théorie, c'est dire que la trajectoire dans l'espace des états appartient à celles qui sont permises par la théorie. La structure mathématique est aussi un modèle au sens où une maquette d'avion utilisée en soufflerie est un modèle d'un avion réel, ou qu'un plan imprimé des rues d'une ville est un modèle de cette ville. On veut dire par là que certaines relations importantes sont respectées entre l'objet et son modèle : des proportions, des angles, des intersections, etc. Cela signifie formellement qu'il existe des isomorphismes de structure entre le modèle et le système étudié (ou une partie de l'un ou de l'autre)[47]. Revenons à notre exemple du mobile : la trajectoire de l'espace des phases de la figure 3.1 rend vraie la théorie de la mécanique classique, dans la mesure où une somme des forces nulle entraîne effectivement une vitesse constante. Cette trajectoire est aussi un modèle au sens d'une représentation, s'il existe un isomorphisme entre cette trajectoire mathématique et le phénomène empirique. Dire qu'il existe un tel isomorphisme revient à dire que le modèle est empiriquement adéquat.

La figure 3.2 résume les différents éléments d'analyse et leurs relations. Partant du phénomène empirique, on définit tout d'abord un système physique idéalisé, au moyen d'éléments fictionnels et dans les paramètres de la théorie ; ce système physique est

[46] Il s'agit là de la position de van Fraassen, à laquelle souscrit Hughes. Moulines (2006, p. 124) note que pour Suppes les modèles ne sont pas des trajectoires d'un espace des états, mais des structures déterminées par la théorie des ensembles.

[47] Sur l'importance de ces isomorphismes, cf. par exemple French (2003).

ensuite représenté par un modèle, qui est pour van Fraassen une structure mathématique et qui consiste en des trajectoires dans l'espace des phases ; le modèle satisfait les axiomes de la théorie. La structure mathématique est un modèle en deux sens : d'une part, au sens mathématique envers les axiomes de la théorie qu'elle satisfait ; d'autre part, envers le système physique qu'elle représente.

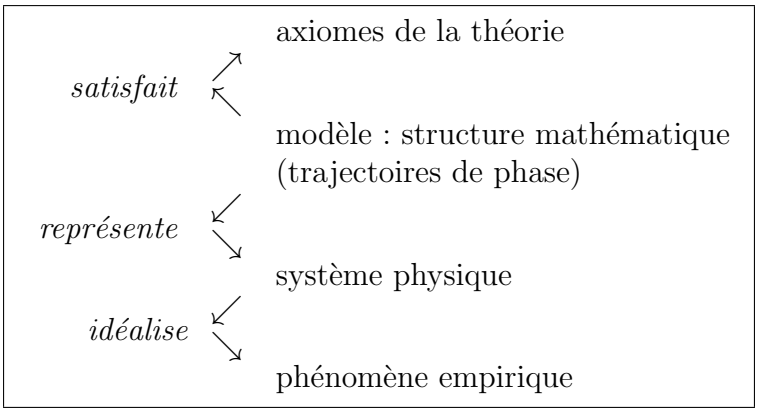

FIGURE 3.2 – Schéma de l'analyse de la conception sémantique. Un phénomène empirique est idéalisé au travers d'un système physique, qui est lui-même représenté par un modèle, ici la structure mathématique de la trajectoire dans l'espace des phases, et le modèle satisfait les axiomes de la théorie.

Quelques nuances peuvent être apportées au schéma présenté, notamment à travers les positions défendues respectivement par Hughes ou van Fraassen. Selon Hughes, le modèle ne consiste pas seulement en des trajectoires de phase. Il comprend aussi l'espace des phases en général, les fonctions et opérateurs mathématiques qui peuvent agir dans cet espace et diverses grandeurs qui peuvent être obtenues. Selon Hughes, le modèle comprend donc l'ensemble de l'appareil mathématique qui régit la dynamique de cet espace des phases. Cela correspond aux outils que les physiciens manipulent habituellement — on retrouve ainsi un sens du terme « modèle » plus proche de celui employé par les physiciens.

Selon van Fraassen (1970, 1980), c'est aussi l'espace des phases qui joue un rôle central lorsqu'il s'agit d'établir l'adéquation empirique d'une théorie. Il s'agit de comparer d'une part les trajectoires des modèles de la théorie et d'autre part celles obtenues expérimentalement. Toutes ces trajectoires sont considérées comme des structures mathématiques ; leur comparaison se fait grâce à un isomorphisme entre ces structures. On dit qu'une théorie est empiriquement adéquate s'il existe un modèle tel que toutes les trajectoires expérimentales (possibles) soient isomorphes aux trajectoires théoriques. C'est par cette similarité de structure entre l'expérimental et le théorique

qu'on conclut à l'adéquation empirique.

2.2 La conception sémantique permet-elle de rendre compte de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations ?

À présent que la conception sémantique (de van Fraassen et Hughes, pour l'essentiel) a été présentée, je vais étudier comment elle propose d'analyser la situation de la mécanique quantique et de sa pluralité d'interprétations. Cela va être facilité par le fait que les auteurs que je considère ont appliqué leur analyse à la mécanique quantique. Rappelons les quelques points que doit satisfaire une analyse des théories scientifiques dans le cas de la mécanique quantique : elle doit avoir les moyens de parler des interprétations et de leur pluralité, expliquer cette pluralité des interprétations et enfin rendre compte de l'équivalence empirique entre les interprétations. La thèse que je défends dans cette section est que la conception sémantique satisfait ces exigences : elle est la conception des théories scientifiques qui permet de rendre compte adéquatement de la pluralité des interprétations de la mécanique quantique.

Dans la formulation orthodoxe de la mécanique quantique, l'espace des phases est l'espace de Hilbert, qui est un espace vectoriel. L'état d'un système est représenté par un vecteur. Cet espace de Hilbert est très généralement un espace de dimension infinie, à l'inverse de l'espace des états de la mécanique classique[48]. Des opérateurs hermitiens agissent sur ces vecteurs ; ils représentent des observables. Les trajectoires de phase sont des vecteurs dépendant du temps.

À quoi correspondent les différentes interprétations quantiques (orthodoxe, bohmienne, everetienne) dans l'analyse de la conception sémantique et notamment dans le schéma de la figure 3.2 que j'ai proposé ? Hughes apporte un élément de réponse, lorsqu'il écrit qu'interpréter la mécanique quantique, c'est

> « proposer un cadre catégoriel dont les éléments trouvent une représentation dans les modèles de l'espace de Hilbert que la théorie présente. »[49]

On remarque tout d'abord que Hughes s'inscrit dans le cadre de la figure 3.2 : la théorie se présente à travers des modèles, qui sont des structures mathématiques de

[48] Pour le comprendre, considérons le cas simple d'une particule se déplaçant dans l'espace à une seule dimension selon un axe x. Soient les vecteurs $|x_k\rangle$ où $k \in \mathbb{R}$, avec $|x_k\rangle$ repérant la position k sur l'axe x. Ces vecteurs forment une famille libre, car ils sont deux à deux orthogonaux. L'espace de Hilbert de la particule est donc de dimension au moins supérieure à la dimension de cette famille, qui est infinie. On note que pour cette même particule traitée en mécanique classique, l'espace des états n'est pas de dimension infinie, mais seulement 2 (cf. l'exemple de la section 2.1).

[49] Hughes (1989), p. 301.

l'espace des phases, à savoir ici l'espace de Hilbert. Hughes emploie la notion de « cadre catégoriel » ou, de façon similaire, de « schéma conceptuel »[50], qui consiste en

> « un ensemble d'hypothèses métaphysiques fondamentales concernant les sortes d'entités et les sortes de processus qui se trouvent dans le domaine de la théorie. »[51]

Ainsi, interpréter la théorie suppose de caractériser les entités que peuvent représenter les modèles de la théorie. Par exemple, cela revient à prendre position sur la possibilité d'employer les concepts de système et de propriété, dans le sens qu'ils ont dans le langage commun (ou dans la physique classique). Il s'agit aussi de dire quelles sont les entités dans le monde dont les modèles peuvent être une représentation. À cause de la structure de ces modèles, tous les types d'entités ne sont évidemment pas possibles. On s'aperçoit que l'expression de « cadre catégoriel » de Hughes recouvre en fait la définition de travail (se voulant consensuelle) que j'avais proposée au chapitre 1, section 2.4 : l'interprétation fournit l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie, en précisant les types d'objets et de propriétés que le monde comporte.

Voyons à présent dans quel sens l'interprétation peut être empirique. Vis-à-vis des modèles mathématiques, donner une interprétation c'est dire ce que ces modèles représentent. Or d'après le schéma de la figure 3.2, un modèle représente un système physique, c'est-à-dire une idéalisation des phénomènes empiriques : interpréter une théorie, est-ce donc proposer un système physique auquel elle s'applique ? On retrouverait alors une notion d'interprétation qui soit seulement empirique. En réalité, lorsque la conception sémantique considère l'interprétation d'une théorie, elle ne s'intéresse pas à un seul modèle particulier (dont tous les paramètres sont spécifiés, comme par exemple la masse ou la charge), mais à la classe de tous les modèles qui satisfont la théorie. On ne cherche donc pas à décrire *un* système physique particulier (celui de telle expérience), mais à caractériser *l'ensemble* de tous les systèmes possibles que les modèles peuvent représenter. J'ai dit que les systèmes physiques, qui sont des idéalisations des phénomènes empiriques, sont décrits dans les termes de la théorie : interpréter une théorie, c'est caractériser ce que peuvent être ces systèmes physiques, ou les entités dont ils peuvent se composer. On donne ainsi l'ensemble des

[50] Il écrit aussi : « Nous interprétons une théorie en reconnaissant, dans les modèles que la théorie fournit, des éléments d'un schéma conceptuel particulier. » (Hughes, 1989, p. 175). Cf. à ce sujet la section 2.4 du chapitre 1.

[51] Hughes (1989), p. 175.

systèmes physiques possibles. Interpréter la théorie consiste ainsi à proposer des types d'entités que les modèles peuvent représenter.

Étudions à présent si les différents éléments d'analyse de la conception sémantique dépendent de l'interprétation quantique adoptée. Je me réfère ici encore à la figure 3.2 : les éléments d'analyse sont les axiomes, les modèles et les systèmes physiques. Tout d'abord, étant donné ce que je viens de dire de l'interprétation, il est clair que la détermination d'un système physique dépend de l'interprétation quantique adoptée. Pour la mécanique bohmienne, un système est toujours composé de particules ayant une position précise à chaque instant ; selon l'interprétation orthodoxe, un système n'a pas toujours de position déterminée. Les axiomes de la théorie, ensuite, dépendent de l'interprétation quantique choisie. Lors de la présentation des différentes interprétations au chapitre 2, il est apparu que chaque interprétation expose naturellement la mécanique quantique selon des axiomes différents (comparer par exemple les axiomes orthodoxes p. 45 et ceux, bohmiens, p. 63). Enfin, les modèles dépendent eux aussi, au moins indirectement, de l'interprétation quantique. Les modèles de l'interprétation orthodoxe s'appuient seulement sur l'espace de Hilbert, mais ceux de l'interprétation bohmienne s'appuient aussi sur l'ensemble des positions des particules à chaque instant (qui est une variable que ne considèrent pas les interprétations orthodoxe et everettienne).

Puisque les axiomes, les modèles et les systèmes physiques dépendent de l'interpétation quantique, étudions à présent comment ils peuvent être reliés ensemble. Considérons les modèles associés à des interprétations quantiques différentes. Les trajectoires qu'ils définissent respectivement pour les vecteurs de l'espace de Hilbert présentent de grandes similitudes. Elles ne sont pas exactement les mêmes car, par exemple, l'interprétation orthodoxe suppose une projection de l'état, tandis que les interprétations d'Everett et de Bohm n'en supposent pas. Les trajectoires de phase de Bohm ne sont pas non plus identiques à celles d'Everett, car la mécanique bohmienne fait appel à l'espace des positions des particules. Par ailleurs, les opérateurs de la mécanique bohmienne doivent aussi se réduire à des opérateurs de position. On peut néanmoins facilement identifier des sous-structures identiques, ou du moins isomorphes, dans les différents modèles. C'est ce qui permet d'établir l'équivalence entre les différents modèles quantiques, associés à des interprétations différentes. La conception sémantique permet ainsi d'établir l'équivalence empirique entre les interprétations quantiques.

L'existence des isomorphismes entre les sous-structures des modèles permet d'affirmer que tous satisfont les différentes axiomatisations proposées. Par exemple, si

un modèle bohmien satisfait l'axiomatisation de Bohm de la mécanique quantique, si un modèle orthodoxe satisfait l'axiomatisation orthodoxe et si ces deux modèles présentent un isomorphisme approprié, alors on peut affirmer que le modèle bohmien satisfait l'axiomatisation orthodoxe et vice-versa. Ainsi, on est en mesure d'établir que la classe de tous les modèles quantiques (ceux associés à toutes les interprétations quantiques) satisfont bien les différentes axiomatisations possibles. Autrement dit, la conception sémantique considère que les différentes interprétations quantiques définissent une seule et même théorie, qui peut être présentée par la classe de tous ses modèles, associés à l'une ou l'autre de ces interprétations. J'ai ainsi montré que la conception sémantique est en mesure de rendre compte de l'équivalence empirique entre les interprétations — la troisième contrainte.

Suppe indique d'ailleurs que l'approche sémantique a été utilisée pour montrer l'équivalence, aujourd'hui bien connue, entre différentes formulations de la mécanique quantique :

> « La preuve de von Neumann selon laquelle la mécanique ondulatoire et la mécanique matricielle sont des formulations équivalentes de la théorie quantique met en jeu fondamentalement une telle approche [sémantique] »[52]

Ainsi, non seulement la conception sémantique est l'outil adapté pour une reconstruction formelle de la mécanique quantique, mais il est également utilisé en pratique par des scientifiques pour prouver une équivalence.

L'analyse sémantique que l'on vient de voir est aussi en mesure de satisfaire la deuxième contrainte, à savoir expliquer la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. Comme une théorie est définie par la classe des modèles qui la rendent vraie, elle englobe tous les modèles que peuvent proposer différentes interprétations et tous ceux auxquels aucun physicien n'a encore pensé. Tous les modèles qui présentent certains isomorphismes adéquats sont éligibles. Si on considère maintenant tous les modèles d'une théorie, il n'y a pas de raison pour qu'ils ne représentent tous qu'un seul monde possible et qu'un seul ensemble d'entités. Un modèle peut représenter telles entités et un autre telles autres entités. Selon la conception sémantique, la règle semble être la sous-détermination de l'interprétation : les modèles représentent de nombreux mondes différents et des entités avec des caractéristiques et propriétés différentes. C'est ainsi que, grâce au fait qu'elle inclue la classe de tous les modèles qui satisfont une théorie, la conception sémantique permet d'expliquer la pluralité des interprétations d'une théorie.

[52] Suppe (1977), p. 222.

Pour conclure, la conception sémantique des théories parvient à rendre compte adéquatement de la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. En s'intéressant aux modèles qui satisfont la théorie, elle laisse de la place à une diversité d'interprétations. Elle permet de considérer que toutes les interprétations quantiques font partie de la même théorie de la mécanique quantique. En montrant l'existence d'isomorphismes entre certaines sous-structures des modèles de la théorie, la conception sémantique est aussi capable de rendre compte de l'équivalence empirique entre les interprétations quantiques.

Conclusion

Ce chapitre a examiné quelle conception philosophique des théories scientifiques est en mesure d'analyser correctement la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations. J'ai considéré deux candidats : la conception dite syntaxique et celle dite sémantique. Je les ai confrontées aux interprétations quantiques qui ont été présentées dans le chapitre précédent — interprétation orthodoxe, bohmienne et everettienne. Dans la section 1, j'ai montré que la conception syntaxique, dans la version la plus connue de Hempel et Carnap, échoue à rendre compte de la pluralité d'interprétations. En se focalisant sur le langage et la syntaxe des énoncés employés, elle se voit obligée de considérer que les interprétations définissent autant de théories différentes. Elle n'est pas non plus en mesure de montrer l'équivalence empirique entre les interprétations. Même la version de Nagel, qui fait droit à la notion de modèle, ne parvient pas à dépasser les limitations de la conception syntaxique des théories. J'ai considéré ensuite (section 2) la conception sémantique des théories, dans la version défendue par van Fraassen et Hughes (ce dernier pour ce qui concerne l'application de cette conception au cas de la mécanique quantique). Selon elle, une théorie se présente à travers la classe des modèles qui la satisfont. Ce sont ces modèles qui représentent les entités de l'interprétation quantique. J'ai montré comment une telle analyse permet de considérer toutes les interprétations quantiques comme faisant partie d'une même théorie. Elle définit aussi adéquatement l'équivalence empirique grâce à la notion d'isomorphisme entre les modèles. C'est donc la conception sémantique qui est en mesure de rendre compte de l'unité théorique de la mécanique quantique.

Deuxième partie

La pluralité des interprétations quantiques d'un point de vue pratique

Introduction

Cette partie propose d'étudier la pluralité des interprétations quantiques au moyen d'une nouvelle approche, qui considère la pratique scientifique. Afin de présenter en quoi elle consiste, il peut être utile de la comparer avec l'approche qui a été adoptée dans la première partie de cette thèse. Dans les chapitres précédents, j'ai étudié la mécanique quantique à travers la reconstruction de son contenu empirique : la théorie se présente à travers des axiomes ou un ensemble de modèles. Je ne me suis pas intéressé, par exemple, à la façon dont les scientifiques parviennent à appliquer ces axiomes à un problème donné. Les interprétations quantiques, de leur côté, ont aussi été présentées sous une forme reconstruite, avec leurs caractéristiques générales. Je n'ai pas étudié comment les scientifiques les emploient, si l'une d'elle est plus appropriée pour traiter d'un problème donné, ou quelle difficulté les scientifiques peuvent rencontrer à comprendre un article scientifique formulé dans une autre interprétation. L'approche de cette première partie, je l'avais indiqué, peut être qualifiée de « en principe »[1]. Dans cette deuxième partie, j'adopte une approche parfois qualifiée de « en pratique ». Je ne m'intéresse pas seulement à la connaissance scientifique reconstruite, mais aussi à la façon dont cette connaissance est produite ou utilisée par les scientifiques. Cela suppose de prendre en compte ce qui ressort de la pratique scientifique : l'utilisation de formulations mathématiques particulières, de techniques expérimentales, de schémas explicatifs par exemple. Je m'intéresse au fait que chacune de ces composantes existe sous des formes différentes, sans les réduire les unes aux autres sous prétexte, par exemple, qu'elles sont en principe équivalentes.

Cette nouvelle approche méthodologique, qui fait droit à la pratique, permet de poser certaines questions de nouveau ou d'opérer de nouvelles distinctions. Par exemple, parmi tous les calculs qui peuvent être effectués en principe, on peut distinguer ceux qui sont faisables par un être humain ou un ordinateur actuel, dans un temps raisonnable, et ceux qui seront hors de portée pour encore des décennies de progrès de l'informatique. Lorsqu'on sait que des formulations différentes d'une théorie sont mathématiquement équivalentes, une approche en pratique peut étudier laquelle est la plus adaptée à la résolution d'un problème donné.

Dans le cas de la pluralité des interprétations quantiques que j'étudie dans cette thèse, l'approche en pratique permet de poser de nouvelles questions. Lorsqu'on sait que toutes les interprétations sont empiriquement équivalentes[2], on peut encore étu-

[1] Humphreys (2004).
[2] Cf. chapitre 2, section 4.

dier lesquelles s'avèrent être les mieux adaptées pour traiter de tel ou tel problème. Notamment, les formulations mathématiques qui sont naturellement associées aux différentes interprétations[3] peuvent autoriser des résolutions plus ou moins faciles. Au contraire, il se pourrait que les interprétations ne jouent en réalité aucun rôle particulier pour le travail des scientifiques. La question de l'unité de la théorie peut être posée de nouveau : au chapitre 3, section 2.2, j'ai montré avec l'approche « en principe » que les interprétations quantiques définissent une même théorie, au sens de la conception sémantique des théories. D'un point de vue pratique, étudier l'unité consiste à savoir si un scientifique est à même de comprendre un article rédigé dans une interprétation qu'il n'utilise pas, ou s'il existe des échanges scientifiques entre des physiciens qui adoptent des interprétations différentes.

L'objectif de cette partie est d'étudier plus précisément de telles questions. Le chapitre 4 s'attache à montrer que les interprétations quantiques jouent des rôles importants dans la recherche scientifique. J'analyse ces rôles à l'aide d'exemples de travaux significatifs de l'histoire récente de la mécanique quantique. J'établis ainsi que les différentes interprétations sont utilisées dans la communauté physicienne et qu'elles influencent la pratique scientifique. Le chapitre 5 étudie l'unité de la mécanique quantique qui en résulte. Elle veut répondre au problème suivant : si la diversité d'interprétations se traduit aussi dans la pratique scientifique, quelles conséquences cela a-t-il quant à l'unité de la recherche en mécanique quantique ? Je montre que c'est surtout de façon instrumentaliste et pragmatique qu'une pratique consensuelle existe en mécanique quantique. Je développe une nouvelle notion d'unité, fondée sur l'existence de certaines relations de réutilisation entre les travaux scientifiques.

Je veux enfin préciser la méthodologie adoptée. Dans cette approche qui s'intéresse à la pratique scientifique, je me limite exclusivement aux facteurs épistémiques, qui sont en général publics et conscients : j'étudie plus particulièrement les contenus des publications scientifiques, ainsi que des travaux préparatoires. Je délaisse ici par exemple les compétences tacites. Je n'étudie pas non plus les divisions de la communauté scientifique pour des motifs sociologiques, tels les institutions. La description de la pratique scientifique que je propose est idéalisée : elle consiste essentiellement à identifier certains paramètres qui affectent (ou devraient affecter) cette pratique. Ce faisant, cette idéalisation a pour but de préparer l'approche davantage normative qui sera adoptée dans la partie 3.

[3]Cf. chapitre 2, p. 51.

Chapitre 4

Les interprétations quantiques dans la pratique scientifique

Introduction

Les interprétations de la mécanique quantique ont été étudiées jusqu'à présent sans considérer la façon dont les scientifiques les utilisent dans leur travail de recherche. Ce chapitre a pour but de pallier ce manque. Il s'attache à étudier en quoi la pratique scientifique est affectée par l'existence d'une pluralité d'interprétations, et si ces interprétations sont effectivement employées. L'expression de « pratique scientifique » comprend à la fois les concepts et le vocabulaire employé, la formulation mathématique de la théorie utilisée, les questions considérées comme significatives, ou les schémas explicatifs retenus (une définition plus complète sera donnée à la section 1). Je considère que cette pratique scientifique se manifeste dans les articles publiés ainsi que dans les travaux préparatoires de recherche qui ne sont pas forcément rendus publics[1].

Il s'agit d'étudier comment l'interprétation quantique adoptée par un physicien modifie sa pratique scientifique. J'ai montré par exemple au chapitre 2 (p. 51) qu'il existe pour chaque interprétation quantique une formulation mathématique de la théorie qui lui est naturellement associée. Ces formulations sont-elles utilisées par les physiciens dans leurs travaux de recherche ? Si une seule formulation est employée,

[1] Je veux ménager ici la possibilité que les scientifiques travaillent et fassent leurs découvertes au moyen d'une certaine pratique scientifique, mais publient des articles qui témoignent d'une autre pratique. La section 3 va montrer qu'il s'agit effectivement d'un phénomène qui a lieu en mécanique quantique. Il est donc indispensable de distinguer comment les résultats ont été obtenus de la forme publique qu'ils prennent finalement.

alors cela peut suggérer que les interprétations quantiques n'affectent pas particulièrement la pratique scientifique. S'il s'avère que les scientifiques mènent leurs recherches avec une seule interprétation, ou avec aucune interprétation particulière, alors la pluralité des interprétations quantiques n'existerait pas vraiment dans la recherche contemporaine, d'un point de vue pratique. Dans ce chapitre, je veux étudier cette possibilité et voir si la pluralité d'interprétations quantiques, dont on a établi l'existence en tant qu'objet théorique, se traduit dans la pratique scientifique[2]. Je défends la thèse selon laquelle les interprétations quantiques modifient la pratique scientifique. Notamment, j'établis le résultat important selon lequel il n'existe pas de pratique scientifique interprétativement neutre. Cela signifie que les physiciens sont obligés de prendre parti (même implicitement) pour une interprétation quantique particulière dans leurs recherches, et que leur pratique scientifique en est nécessairement influencée. Je montre aussi que les interprétations quantiques jouent effectivement des rôles importants dans la recherche scientifique contemporaine : la pluralité des interprétations quantiques est aussi une réalité en pratique. À ma connaissance, ce constat n'a pas été établi jusqu'à présent.

Si ce constat n'a pas été dressé jusqu'à présent, c'est peut-être en partie pour la raison suivante. À ma connaissance, la question de savoir si la pratique scientifique dépend de l'interprétation quantique adoptée n'a pas non plus été abordée pour elle-même. Il existe seulement des études historiques de cette question, qui se sont surtout concentrées sur les travaux scientifiques (ou la carrière) de ceux qui ont développé ou défendu des interprétations particulières[3]. D'un autre côté, les philosophes des sciences qui se sont intéressés à la pratique scientifique, par exemple Kitcher ou Galison, n'ont pas étudié la mécanique quantique et sa pluralité d'interprétations. Aussi, l'entreprise méthodologique de ce chapitre, qui consiste à étudier la pluralité des interprétations d'un point de vue pratique, est nouvelle au regard de la littérature existante ; elle est néanmoins à la croisée d'approches déjà explorées.

Pour illustrer mon propos dans ce chapitre, je prends des exemples de travaux significatifs du domaine quantique. Je les choisis essentiellement dans l'histoire récente de la mécanique quantique, depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui. Comme je l'ai indiqué dans l'introduction de cette thèse, je ne prétends pas proposer par là une nouvelle lecture historique de la discipline. Certains des travaux auxquels je fais appel ont été bien étudiés par les historiens et je me sers dans ce cas de leurs analyses. Je

[2]Je précise que dans ce chapitre, je considère la pratique scientifique seulement à travers les travaux de recherche, sans m'intéresser à l'enseignement de la discipline.

[3]Par exemple les différents travaux de Freire (2004, 2005, 2006, 2009) auxquels je fais référence dans les sections suivantes.

m'appuie aussi d'autres travaux, dont certains sont très récents, qui n'ont pas fait l'objet d'une étude historique. Dans ce cas, l'analyse que je propose est la mienne.

Le chapitre se déroule en trois temps. Tout d'abord, je précise la définition de la pratique scientifique et je montre que chaque interprétation quantique peut définir une pratique différente. Dans un deuxième temps, je distingue deux rôles qu'une interprétation peut jouer en pratique : dans la production d'un travail scientifique et dans sa publication. Enfin, à l'aide d'exemples significatifs de différents domaines de recherche, j'établis que les diverses interprétations quantiques jouent ces rôles dans la recherche scientifique. Cela me permet d'affirmer que la pluralité d'interprétations existe en pratique dans la recherche en mécanique quantique.

1 Comment la pratique scientifique peut dépendre de l'interprétation quantique adoptée

Considérons un scientifique qui adopte une interprétation quantique particulière lors de son travail de recherche. S'il changeait d'interprétation, il est vraisemblable que certains aspects de sa pratique seraient modifiés. Par exemple, j'ai indiqué qu'il pourrait changer de formulation mathématique de la théorie, pour employer celle qui est associée avec sa nouvelle interprétation. Les concepts et le vocabulaire employés pourraient aussi être différents. S'il abandonnait l'interprétation orthodoxe pour celle d'Everett, il parlerait de « mondes multiples » et n'emploierait plus le concept de réduction de la fonction d'onde. Pourrait-il y avoir d'autres changements dans sa pratique scientifique ?

Pour répondre à cette question, je vais tout d'abord préciser ce que j'entends par la « pratique scientifique ». Je reprends à mon compte la définition donnée par Philip Kitcher dans son livre *The Advancement of Science* :

> « Je considérerai que la pratique d'un scientifique est une entité multidimensionnelle dont les composantes sont les suivantes :
> 1. Le langage que le scientifique utilise dans son travail professionnel.
> 2. Les questions qu'il identifie comme les problèmes significatifs du domaine.
> 3. Les énoncés (images, diagrammes) qu'il accepte à propos du domaine.
> 4. L'ensemble des motifs (ou schémas) qui sous-tendent les textes que le scientifique considérerait comme explicatifs.
> 5. Les exemples standard d'informateurs crédibles plus les critères de crédibilité que les scientifiques utilisent pour évaluer les contributions des sources poten-

> tielles d'information pertinente à propos du domaine.
> 6. Les paradigmes d'expérimentation et d'observation [...].
> 7. Des cas exemplaires de raisonnement scientifique correct ou erroné, associés aux critères pour évaluer les énoncés proposés (la 'méthodologie' du scientifique). »[4]

Ces différentes composantes vont être présentées et explicitées au fur et à mesure dans pages suivantes.

Le but de cette section est d'étudier la question de savoir si ces composantes peuvent changer avec l'interprétation adoptée par le scientifique. Lorsque je dis qu'un scientifique « adopte » telle interprétation, cela peut recouvrir un engagement réaliste de sa part envers les entités de l'interprétation, mais aussi un choix seulement pragmatique et temporaire, où l'interprétation n'est qu'une hypothèse de travail[5]. Précisons quelques points auxquels je me limite ici. Tout d'abord, il s'agit d'établir si des scientifiques qui adoptent des interprétations quantiques différentes peuvent être conduits à adopter des pratiques scientifiques semblables, ou si au contraire elles sont nécessairement différentes. Je me limite à établir l'existence de possibles différences entre ces pratiques (étudier ce qu'elles ont en commun sera l'objet du chapitre suivant). Ce faisant, je défends la thèse qu'il existe une pluralité des pratiques scientifiques qui découle de la pluralité des interprétations elles-mêmes. Il me semble qu'elle est trop souvent passée sous silence. Ensuite, j'en reste dans cette section à ce que qui *peut* varier en fonction de l'interprétation, dans la pratique scientifique. Lorsque j'identifie des pratiques scientifiques différentes, je ne me prononce pas sur le fait qu'elles soient effectivement adoptées par les scientifiques (je donne quelques exemples factuels, mais sans juger de leur importance). Cette question factuelle sera abordée dans la section 3. Je précise à nouveau ici qu'étudier la question de savoir si la pratique scientifique dépend de l'interprétation de la théorie adoptée par les scientifiques n'a pas été entrepris jusqu'à présent. Cette application de l'analyse de Kitcher à la mécanique quantique est la mienne.

Dans cette section 1, je défends la thèse selon laquelle les composantes de la pratique scientifique peuvent dépendre de l'interprétation adoptée. Je l'illustre à l'aide d'exemples pour chacune d'entre elles (sections 1.1 à 1.5). Cela me conduit à définir la notion de « pratique scientifique associée à une interprétation » (section 1.6). Je pose enfin la question de savoir s'il peut exister une pratique scientifique interprétativement neutre. Si cela était le cas, cela permettrait aux physiciens d'utiliser la théorie sans

[4]Kitcher (1993), p. 74.
[5]Je reviens plus longuement sur ces nuances dans le chapitre 5.

prendre parti interprétativement. Mais je montre qu'il n'en est rien (section 1.7).

1.1 Le langage et les énoncés acceptés

Le langage utilisé par les scientifiques dépend de l'interprétation quantique qu'ils adoptent. On l'a vu au chapitre 2 : les interprétations orthodoxe, bohmienne et everettienne ont des vocabulaires différents pour référer aux entités des mondes qu'elles décrivent, ou pour formuler la théorie. Par exemple, l'interprétation orthodoxe emploie le concept de « réduction » de la fonction d'onde, que nulle autre interprétation n'utilise. La mécanique bohmienne propose un vocabulaire de particules et de potentiel quantique. Elle introduit les nouvelles variables que sont les positions Q_k des particules. De son côté, l'interprétation everettienne parle de « mondes », d'« embranchement », de paris d'agents. Si certains termes, comme « fonction d'onde » ou « probabilité » font partie du langage de chacune des interprétations, il faut cependant noter que ces termes n'y ont pas la même signification[6].

Il est important de remarquer que c'est l'ensemble du langage qui dépend de l'interprétation. Même en supposant que la distinction entre une partie observationnelle et une partie théorique du langage soit tenable (ce que j'ai remis en cause au chapitre 3, p. 100 et suivantes) ce sont ces deux parties qui dépendent de l'interprétation considérée. Même le vocabulaire observationnel diffère selon les interprétations. L'interprétation orthodoxe parle d'un « résultat de mesure d'une observable », quand la mécanique bohmienne considère la « position de particules » et l'interprétation everettienne le « pari d'agent ».

Pour des scientifiques qui adoptent des interprétations différentes, une conséquence directe de l'utilisation de langages différents est l'acceptation d'énoncés différents. Cela a été établi lors de la discussion de la conception syntaxique des théories, au chapitre 3, section 1. Les axiomes de la théorie, tout d'abord sont nettement différents selon les interprétations[7]. L'interprétation orthodoxe introduit par exemple le postulat de réduction de la fonction d'onde, que l'interprétation d'Everett ne reconnaît pas. Les équations mathématiques sont elles aussi différentes : l'équation guidante n'est reconnue que par l'interprétation bohmienne. À partir de groupes d'axiomes différents, les interprétations quantiques déduisent des énoncés (théoriques) différents. Les énoncés d'observation à propos d'un résultat d'expérience ne sont pas non plus identiques selon les interprétations quantiques adoptées. Le simple énoncé « il existe un fait à

[6] Je renvoie sur ce point au chapitre 2, et notamment à la section 4.4.

[7] Je m'appuie ici sur l'idée qu'il existe une « formulation naturelle de la théorie » pour une interprétation (cf. chapitre 2, p. 51).

propos de la décroissance radioactive de l'atome » est accepté par les interprétations orthodoxe et de Bohm, mais pas par celle d'Everett[8].

1.2 Les questions significatives

Je poursuis l'examen des diverses composantes de la pratique scientifique telle qu'elle est analysée par Kitcher, en me tournant à présent vers les questions que les scientifiques considèrent comme significatives. Il s'agit des problèmes qu'ils jugent pertinents et dignes d'être étudiés, en fonction du cadre théorique (et éventuellement : interprétatif) qui est le leur. Comme pour les autres composantes, je vais montrer que les questions significatives peuvent dépendre de l'interprétation adoptée — c'est-à-dire que certaines questions sont importantes pour une interprétation et pas pour une autre. Les questions significatives n'ont pas encore été abordées dans les chapitres précédents. Je vais donc présenter dans cette section plusieurs exemples, choisis parmi différents domaines de recherche de la mécanique quantique. Le premier illustre qu'une question particulière, celle de la non-localité de la théorie, n'a été abordée que grâce à l'interprétation de Bohm. Dans un deuxième temps, je montre de façon plus générale qu'une interprétation a pu avoir un rôle inhibiteur vis-à-vis de certaines questions, en l'occurence l'interprétation orthodoxe vis-à-vis des questions sur les fondements de la théorie. Un troisième exemple traite de travaux récents sur les trajectoires de particules, pertinentes dans le cadre de la mécanique bohmienne. Enfin, j'explique comment la formulation mathématique associée à l'interprétation peut elle aussi suggérer de nouvelles questions significatives.

Le premier exemple concerne un résultat théorique très célèbre, connu sous le nom d'« inégalités de Bell », et qui a été établi par le physicien irlandais John Bell en 1964. Ce qui est intéressant dans cet exemple, ce sont les motivations qui ont conduit Bell à prouver ce résultat. Je vais expliquer en quoi elles sont liées à une interprétation en particulier. Voici tout d'abord une présentation simplifiée de la teneur du théorème établi par Bell. Il considère une expérience dans laquelle une paire d'électrons, qui forment initialement un système quantique dans un état particulier et spatialement localisé, sont envoyés dans des directions opposées vers deux détecteurs différents. Ces derniers mesurent leur spin. En vertu de l'état initial particulier des deux électrons, il se trouve que les résultats de mesures aux deux détecteurs sont corrélés : lorsqu'un détecteur mesure pour un électron un spin vers le haut, l'autre mesure toujours un spin vers le bas, et vice-versa. Dans l'expérience envisagée, des mesures du spin selon

[8]Cf. chapitre 2, section 4.3.

plusieurs directions sont effectuées. Le théorème de Bell suppose ensuite l'existence de *variables cachées*. Par cette expression, il faut comprendre l'idée d'une théorie qui introduirait des variables supplémentaires par rapport à celles de la mécanique quantique orthodoxe, variables qui détermineraient par avance le résultat des mesures. En d'autres termes, ces variables permettraient de changer profondément la nature des prédictions probabilistes de la mécanique quantique : au lieu de probabilités objectives témoignant d'un hasard fondamental (selon l'interprétation orthodoxe), elles deviendraient des probabilités subjectives. Autant dire qu'il s'agit d'une idée qui a été étudiée passionnément depuis le début de la mécanique quantique, dans les années 1920. Le théorème de Bell fait l'hypothèse qu'il existe une telle variable cachée pour les électrons de l'expérience. Cette variable supplémentaire est censée déterminer le résultat de la mesure du spin des électrons, selon la direction de mesure envisagée. Bell fait l'hypothèse que le résultat d'une mesure sur l'un des électrons ne peut pas être affectée instantanément par des opérations conduites sur l'autre électron (c'est l'hypothèse de localité). Autrement dit, la variable cachée ne peut être modifiée instantanément à distance. En traduisant cette idée mathématiquement, le théorème de Bell parvient à établir une contrainte (les célèbres inégalités) portant sur les mesures du spin des électrons selon diverses directions. Le résultat surprenant est que les prédictions de la mécanique quantique pour l'expérience en question violent ces inégalités. Bell en déduit que le théorème repose sur une hypothèse erronée, qu'il identifie comme étant l'hypothèse de localité. La conclusion qu'on tire généralement du théorème de Bell est donc la suivante : si les prédictions de la mécanique quantique sont correctes, il ne peut exister de théories à variables cachées locales. Autrement dit, les seules théories à variables cachées compatibles avec les prédictions de la mécanique quantique (orthodoxe) doivent être non-locales[9]

Si les inégalités de Bell sont célèbres, les raisons pour lesquelles Bell a travaillé à ce projet sont parfois moins connues. Il ne l'a pas fait dans le but de s'opposer aux interprétations à variables cachées, par exemple pour montrer qu'elles n'étaient pas possible, ou pour leur imposer des contraintes. Au contraire, il a travaillé sur cette question afin de soutenir la mécanique bohmienne qui avait été proposée quelques années plus tôt (il s'agit d'une interprétation à variables cachées, puisqu'elle introduit

[9]Comme je l'ai indiqué, cette présentation est volontairement simplifiée. Le théorème de Bell a suscité de très nombreux débats, notamment quant à l'analyse de ses hypothèses et de ses conclusions. Pour un aperçu, on peut consulter par exemple Shimony (2009). D'autres conclusions, concernant la non-localité du monde lui-même, peuvent être tirées en associant le théorème de Bell à l'argument d'Einstein, Podolsky et Rosen (1935). Cela sort du propos de cette section : je renvoie à Albert (1992), chapitre 3.

les positions des particules Q_k). Cette interprétation était critiquée pour proposer l'image d'un monde non-local, ce qui constituait pour certains un écart trop grand par rapport au cadre classique. Bell, au contraire, conjecturait que la non-localité était en fait inévitable pour toutes les interprétations à variables cachées et, à ce titre, ne devrait pas être pointée du doigt dans l'interprétation bohmienne. C'est pour cette raison qu'il a entrepris les recherches qui l'ont menées à ses célèbres inégalités. Il l'explique peu de temps auparavant, dans un article portant sur les variables cachées en mécanique quantique :

> « Bien sûr, Bohm était tout à fait conscient de ces caractéristiques [i. e. la non-localité de la mécanique bohmienne] [...]. Il n'y a pas de *preuve* que *n'importe quelle* théorie à variables cachées de la mécanique quantique *doive* avoir ce caractère extraordinaire. Il serait par conséquent intéressant, peut-être, de chercher d'autres 'preuves d'impossibilité'. » [10]

Après avoir fait remarqué que l'interprétation de Bohm n'est pas locale, Bell suggère que toutes les théories à variables cachées pourraient l'être et il propose d'étudier cette question. Il montrera que c'est effectivement le cas avec ses célèbres inégalités. Dans ce passage, Bell témoigne que c'est l'interprétation de Bohm qui lui a suggéré l'importance de la question de la non-localité[11].

Il est important de savoir qu'à cette époque, l'immense majorité des physiciens, qui adoptaient l'interprétation orthodoxe, ne s'intéressait pas particulièrement à la non-localité (alors même qu'elle est présente dans l'interprétation orthodoxe, d'une façon plus déguisée[12]). Tout au plus avaient-ils le souvenir d'un article d'Einstein, Podolsky et Rosen (1935) (souvent appelé l'article EPR) qui abordait cette éventualité mais pour la refuser aussitôt. Cet article prétendait montrer que la mécanique quantique était incomplète, c'est-à-dire qu'elle devait être complétée par une théorie à variables cachées. Pour cela, il s'appuyait sur l'hypothèse que le monde devait présenter une certaine localité. Cet article aurait pu inciter les physiciens à approfondir la question de la localité du monde. Mais Bohr, qui jouissait en 1935 d'un immense prestige, avait écrit une réponse à cet article qui condamnait le raisonnement d'EPR. À cause de cette réponse de Bohr que la communauté physicienne jugea concluante et définitive (bien qu'elle soit aujourd'hui considérée comme obscure et plutôt faible d'un point de vue argumentatif), les physiciens se sont détournés de la question de la complétude de

[10] Bell (1964a), p. 17, ou (1987), p. 11.

[11] Cette lecture fait l'objet d'un consensus historique : cf. par exemple Freire (2004), p. 1745 ; Freire (1992), p. 741 indique d'autres références ; Goldstein (2006), section 2, l'affirme également.

[12] Cf. chapitre 2, p. 47 et suivantes.

la mécanique quantique ou de sa localité. Ainsi, dans les années 1960, presque aucun physicien ne s'intéressait à la localité de la mécanique quantique.

Cet exemple montre ainsi, pour conclure, que la question de la localité n'était pas significative dans le cadre de l'interprétation orthodoxe. Elle l'était seulement avec l'interprétation de Bohm, et c'est grâce à elle que Bell est venu à s'intéresser à une preuve de la non-localité pour les théories à variables cachées. Selon l'interprétation quantique adoptée, les physiciens étaient conduits à considérer des questions significatives différentes.

L'idée que l'interprétation orthodoxe a empêché les physiciens de s'intéresser au caractère local ou non-local de la mécanique quantique peut être généralisée. Dans un second exemple, je vais montrer que l'interprétation orthodoxe a eu, des années 1940 à 70, un rôle inhibitif plus large vis-à-vis des questions considérées comme significatives par les physiciens : elle a fait tenir pour illégitime ou non-pertinente toute interrogation concernant les fondements de la théorie quantique. Ce fait est aujourd'hui bien documenté et plutôt consensuel parmi les historiens des sciences. Freire parle à ce sujet de

> « l'attitude dominante parmi les physiciens à l'époque [autour de 1970], selon laquelle les problèmes fondamentaux avaient déjà été résolus par les pères fondateurs de la discipline. »[13]

La solution de ces pères fondateurs n'est autre que l'interprétation historique de Copenhague, qui évolua en l'interprétation orthodoxe que j'ai présentée au chapitre 2, section 1. Cette interprétation, je l'ai indiqué, s'est rapidement imposée dans la communauté physicienne, au point d'être une interprétation hégémonique pendant plusieurs décennies. Freire indique qu'elle faisait tenir toutes les questions portant sur les fondements de la théorie comme résolues — donc, indignes d'intérêt et non significatives. Freire parle d'un « biais »[14] de la part de l'immense majorité des physiciens sur ces questions.

Comme le courant dominant refusait de considérer que les questions portant sur les fondements étaient légitimes et significatives, cela a eu pour conséquence que tous ceux qui ont cherché à aborder ces questions se sont retrouvés au ban, ou du moins en marge, de la communauté physicienne. Cela est documenté par Freire (2009) dans un article au titre évocateur, « Les dissidents quantiques : recherches sur les fondements de la théorie quantique autour de 1970 ». Il étudie le parcours de plusieurs scientifiques qui ont travaillé sur les fondements de la mécanique quantique autour de 1970.

[13] Freire (2009), p. 280.
[14] Freire (2009), p. 281.

Il établit que quasiment tous étaient critiques de l'interprétation orthodoxe dominante (le seul qui ne l'était pas contribua au débat seulement de manière involontaire). Il montre aussi que nombreux ont été ceux dont la carrière fut entachée de façon indélébile à cause de leurs travaux sur les fondements de la mécanique quantique. Par exemple Zeh, ayant commencé à travailler sur les fondements de la théorie, compris rapidement que sa carrière académique en serait irrémédiablement « détruite » ; il s'en sentit ensuite d'autant plus libre de continuer ses recherches sur le sujet. Un autre exemple est Bohm, qui avait proposé en 1952 une nouvelle interprétation quantique et cherchait à poursuivre ses travaux sur le sujet. Il en a fait les frais dans les années et décennies suivantes. Il a connu un exil scientifique : il dut quitter Princeton et les États-Unis, pour le Brésil, Israël puis l'Angleterre. Dans une période de Maccarthysme, les motifs politiques ont été déterminants dans cette mise à l'écart. Mais les raisons scientifiques elles-mêmes ont joué un rôle de premier plan. Freire défend l'idée que c'est pour des motifs essentiellements scientifiques, notamment le désintérêt des physiciens pour les fondements de la mécanique quantique, que Bohm n'a pas connu de grande carrière académique. [15]

Freire parle aussi du « stigmate »[16] associé, de façon plus générale aux recherches sur les variables cachées. Ce désintérêt actif de la part de la communauté physicienne n'a pas disparu facilement. Même après que Bell a établi en 1964 son résultat d'impossibilité concernant les théories à variables cachées locales, les physiciens ne s'intéressent pas pour autant à la question. J'ai indiqué que le théorème de Bell suppose que les prédictions de la mécanique quantique soient correctes dans la configuration expérimentale qu'il considère. Or jusqu'à présent, une telle configuration n'a pas été étudiée expérimentalement — peut-être la mécanique quantique cesse-t-elle justement d'être correcte pour ce genre d'expériences. Il existerait donc là une question légitime à étudier expérimentalement. Mais celle-ci n'est pas considérée comme digne d'intérêt par le courant dominant et est restée longtemps « un travail pour des contestataires quantiques »[17]. Aspect, qui devait réaliser en 1982 cette expérience, se souvient que la première question de Bell, à qui il venait présenter son projet d'expérience (en 1975), fut : « Est-ce que vous avez un poste permanent ? »[18]. Ce soucis de Bell indique combien il était alors mal vu, et combien il était risqué, de soulever des questions sur les fondements de la mécanique quantique. Aspect se souvient de l'« atmosphère générale

[15]Cf. Freire (2005). Je renvoie à cet article pour l'étude de l'exil de Bohm.
[16]Freire (2009), p. 282.
[17]Freire (2006), p. 579.
[18]Aspect (2002), p. 1.

[...]. Très souvent c'était de l'hostilité ouverte. »[19]. Ce n'est qu'au bout de longues années que ces dissidents sont parvenus à faire que « les fondements de la mécanique quantique, ou au moins une partie des recherches de ce domaine, entre dans le courant dominant de la physique »[20]. L'attitude inspirée par l'interprétation orthodoxe peut véritablement être tenue responsable de la mise à l'écart initiale de tous les travaux portant sur les fondements de la théorie. Il me semble que ce point est généralement sous-estimé : si on est prêt à reconnaître que les diverses interprétations quantiques peuvent suggérer des problèmes différents, on néglige souvent le fait qu'elles peuvent aussi étouffer l'intérêt pour certaines questions.

Je vais maintenant présenter un troisième exemple, positif celui-là, dans lequel une question est significative selon l'interprétation bohmienne, mais pas selon l'interprétation orthodoxe. Elle concerne la notion de trajectoire d'une particule. L'interprétation orthodoxe ne donne un sens à la notion de position que dans une configuration expérimentale qui permet de mesurer la position, et à ce moment-là seulement. Il n'est pas possible de façon générale, selon le point de vue orthodoxe, de parler de position à chaque instant ou de considérer la trajectoire empruntée par une particule. Dans l'interprétation de Bohm en revanche, il existe une position déterminée pour chaque particule à tout moment, et par conséquent il existe une trajectoire (dite « de Bohm ») que la particule emprunte au cours du temps. Rappelons néanmoins que l'interprétation de Bohm ne permet pas de dire quelle trajectoire est effectivement empruntée par une particule dans une expérience donnée — elle ne donne pas de prédiction supplémentaire par rapport à l'interprétation orthodoxe. Elle manipule simplement un ensemble de positions et de trajectoires, au moyen d'une distribution statistique associée. Les trajectoires de Bohm sont des éléments théoriques que seule l'interprétation bohmienne considère — l'interprétation orthodoxe ne leur accorde aucun intérêt et leur reproche d'être prédictivement superflues.

C'est en effet en considérant l'interprétation de Bohm que Wiseman (2007) s'intéresse à la façon dont ces trajectoires pourraient être déterminées expérimentalement[21]. Il montre qu'un procédé particulier, appelé la mesure « faible »[22], permet de reconstruire les trajectoires de Bohm. Précisons que cela n'est pas en conflit avec l'interprétation orthodoxe ou d'autres résultats de mécanique quantique : Wiseman

[19] Aspect (2002), p. 1.

[20] Freire (2009), p. 281. Des études scientométriques ont mis en évidence une forte augmentation de ces débats à partir des années 1970 : cf. les références données par Freire (2009), p. 280.

[21] Certes, Wiseman (2011) se dit « agnostique quant à la meilleure interprétation de la mécanique quantique ». Cela ne l'empêche pas, pour un travail particulier comme celui de 2007, d'avoir été bel et bien motivé par une interprétation particulière, en l'occurence bohmienne.

[22] Ce procédé de mesure a été inventé par Aharonov, Albert et Vaidman (1988).

ne propose pas de déterminer la trajectoire particulière d'une particule, mais seulement de reconstruire *l'ensemble* des trajectoires de Bohm moyennes pour une certaine classe de particules.

Récemment, l'équipe de Steinberg à l'Université de Toronto a mis en œuvre la proposition de Wiseman. Elle est parvenue à mesurer expérimentalement de telles trajectoires de Bohm, dans le cas de photons uniques en sortie d'un dispositif de trous d'Young (Kocsis *et al.*, 2011). Les trous d'Young consistent en deux trous rapprochés percés sur une plaque : lorsqu'un photon arrive face à eux, on observe sur un écran placé plus loin une figure particulière, qui est caractéristique du fait qu'ils ne passent pas, en un sens classique, seulement par l'un ou l'autre de ces trous. Il s'agit d'une expérience paradigmatique de l'optique et de la mécanique quantique. L'expérience montre un accord très satisfaisant avec les prédictions théoriques de Wiseman. Comme pour Wiseman, la motivation qui préside à la réalisation de cette expérience est l'interprétation de Bohm. Les auteurs de l'article écrivent :

> « Ces trajectoires observées expérimentalement résultent d'une définition opérationnelle bien motivée et raisonnable et, dans le cas d'une particule unique, coïncident avec les trajectoires de l'interprétation de la mécanique quantique de Bohm-de Broglie. »[23]

Ce passage montre que l'intérêt de l'expérience consiste précisément à pouvoir retrouver les trajectoires bohmiennes. Ainsi, l'expérience de Kocsis *et al.* est venue répondre, comme l'article de Wiseman, à une question qui est plus significative dans le cadre de l'interprétation bohmienne que pour les autres interprétations. Il est vrai que les prédictions pour cette expérience sont simplement celles de la mécanique quantique, et ne sont pas dépendantes de l'interprétation adoptée. À ce titre, des physiciens orthodoxes auraient matériellement pu travailler à cette expérience. En revanche, ils n'auraient eu aucune motivation pour cela, car les trajectoires qu'il s'agit de reconstruire expérimentalement ne correspondent à rien dans l'interprétation orthodoxe. C'est dans le cadre de l'interprétation bohmienne (qu'on en soit un véritable partisan, ou qu'on l'adopte simplement le temps d'un travail de recherche) qu'elles prennent véritablement sens et deviennent dignes d'intérêt. Elles correspondent alors aux trajectoires considérées par l'interprétation. Ces deux résultats de Wiseman et Kocsis *et al* témoignent du fait que certaines questions sont significatives dans une interprétation mais pas dans une autre. Cela contribue à montrer que, en fonction de l'interprétation quantique adoptée, les physiciens auront des pratiques scientifiques différentes.

[23] Kocsis *et al.* (2011), p. 2.

De tels exemples pourraient être multipliés. Je vais en présenter un dernier, qui illustre un point légèrement différent des précédents : les questions significatives peuvent venir non pas de l'interprétation elle-même, mais de la formulation mathématique qui lui est associée. J'ai dit en effet au chapitre 2, p. 51 que chaque interprétation quantique se voit associer de façon naturelle une formulation mathématique de la théorie. C'est par exemple la formulation que les physiciens utilisent pour présenter la théorie, lorsqu'ils adoptent cette interprétation. Cette formulation repose sur l'utilisation de certains objets mathématiques et d'équations particulières. Par exemple, pour la mécanique bohmienne, elle comprend des variables de position pour les particules et une équation guidante. Les deux articles dans lesquels Bohm présente sa nouvelle interprétation quantique suggèrent explicitement de nouvelles pistes de recherche, par rapport à l'interprétation orthodoxe traditionnelle[24]. Bohm estime en effet que la nouvelle formulation mathématique de la théorie qu'il présente est plus générale que la formulation orthodoxe. Elle permet de modifier la loi d'évolution d'une façon qui n'est pas possible dans la formulation habituelle[25]. Bohm n'a pas l'intention de modifier cette loi pour le domaine expérimental où son exactitude a été montrée. En revanche, il propose de s'intéresser à ce qui est *en dehors* de ce domaine connu, notamment le domaine des petites distances (de l'ordre du picomètre), qui devrait être bientôt accessible aux expérimentateurs. Si, dans ce domaine, un écart aux prévisions à la mécanique quantique habituelle devait être trouvé, alors la formulation habituelle serait condamnée tandis que la sienne pourrait en rendre compte grâce aux modifications qu'elle autorise. Naturellement, Bohm souhaite que l'attention expérimentale soit dirigée vers ces petites distances, puisque cela pourrait permettre à sa formulation mathématique de se démarquer. Ainsi, c'est bien la formulation mathématique associée à sa nouvelle interprétation qui fait dire à Bohm qu'il convient de s'intéresser plus particulièrement au domaine expérimental des petites distances. Les tenants de l'interprétation orthodoxe n'avaient quant à eux pas particulièrement de raison de privilégier ce type de recherche.

L'idée qu'une interprétation de la théorie puisse suggérer, à travers la formulation mathématique qui lui est associée, une certaine généralisation de la théorie, se retrouve exprimée par de nombreux physiciens. J'en citerai deux. Le premier est Richard Jozsa, qui travaille dans le domaine de la computation quantique. Il défend une interprétation

[24]Bohm (1952a), p. 166-9 et 178-9, (1952b), p. 185-7.

[25]Elle permet d'envisager des modifications de la théorie « qui ne pouvaient même pas être décrites dans les termes de l'interprétation usuelle » (Bohm, 1952a, p. 166), c'est-à-dire avec la formulation orthodoxe de la théorie.

de la mécanique quantique en terme d'information[26]. Il écrit :

> « Bien qu'une formulation informationnelle et géométrique d'une théorie physique donnée soient mathématiquement équivalentes, [...] les généralisations naturelles que ces formalismes respectifs suggèrent seraient très différents [...] . »[27]

Jozsa s'inscrit en accord avec mon idée selon laquelle il existe une formulation mathématique associée à une interprétation. Il commence par rappeler que la formulation informationnelle de la mécanique quantique est équivalente à la formulation orthodoxe (qu'il qualifie ici de « géométrique »). Il indique ensuite que ces deux formulations peuvent conduire le physicien à proposer des généralisations différentes. Une généralisation peut consister à étendre le domaine d'application de la théorie, ou à proposer de nouveaux types d'interactions. Ce qui est important pour la question que je considère ici est que pour Jozsa, ces généralisations sont *naturelles* pour le physicien. Par conséquent, il est justifié de dire qu'une généralisation, et donc ensuite certaines questions significatives, peuvent être attachées à une formulation mathématique particulière, elle-même attachée à une interprétation donnée. Autrement dit, des interprétations différentes suggèreront des questions significatives différentes, par le biais des généralisations suggérées par leurs formulations mathématiques associées respectives. Ainsi, Jozsa exprime l'opinion que je défends dans cette section.

Richard Feynman, un physicien ayant travaillé sur la théorie quantique des champs, a exprimé une idée similaire lors de sa conférence Nobel. Il revient sur sa propre expérience de recherche et affirme :

> « Des vues différentes suggèrent de procéder à des types de modifications différents. »[28]

Par « vue », Feynman signifie ici à la fois la formulation de la théorie et l'interprétation qui lui est associée. Face aux différentes formulations d'une même théorie, Feynman considère toutes les modifications qui peuvent être apportées, et non pas seulement aux généralisations. Il est d'avis lui aussi qu'une interprétation donnée *suggère* une modification particulière. Il est donc possible d'associer plus ou moins étroitement à une interprétation une modification, et donc de nouvelles questions significatives. Cela conclut ce dernier exemple, qui a illustré le fait que les formulations mathématiques associées aux interprétations pouvaient être une source de questions

[26]Dans le chapitre 2, je n'ai pas présenté une telle interprétation. Pour une présentation, on peut se référer par exemple à Clifton, Bub et Halvorson (2003), ou Bub (2010).

[27]Jozsa (2004), p. 85.

[28]Feynman (1965).

significatives différentes. De façon plus générale, j'ai montré dans cette section 1.2 que l'adoption d'interprétations différentes peut conduire à considérer des questions différentes comme étant significatives en recherche. La pratique scientifique est donc modifiée par l'interprétation adoptée sur cette composante-là.

1.3 Motifs d'explication

Je considère à présent une autre composante de la pratique scientifique : les schémas explicatifs (l'élément 4 de la citation de Kitcher p. 129). Ils contiennent les motifs que les scientifiques considèrent comme explicatifs, c'est-à-dire ce qui constitue la trame de l'explication. Je vais montrer qu'ils peuvent dépendre de l'interprétation adoptée, comme cela a été le cas dans les sections précédentes. Autrement dit, je vais montrer que des scientifiques qui adoptent des interprétations différentes peuvent reconnaître des motifs d'explication différents.

L'idée générale est la suivante : comme les interprétations quantiques s'appuient notamment sur des formulations mathématiques différentes, elles conduisent à résoudre un même problème de différentes façons. Ces résolutions différentes s'appuient sur des motifs d'explication différents. Je propose d'illustrer ce raisonnement sur un exemple simple, celui de l'expérience de la mesure de spin que j'ai présentée au chapitre 2 (notamment section 2.3). Afin de mesurer le spin d'un électron selon un axe z, on l'envoie dans un appareil (dit de Stern-Gerlach) qui le dévie en fonction de son spin, selon l'axe z. Il n'existe que deux résultats possibles pour la mesure : ou bien l'électron est détecté dans la branche inférieure et on dit qu'il a un spin « vers le bas », noté $|\downarrow\rangle$, ou bien il est détecté dans la branche supérieure et on dit qu'il a un spin « vers le haut », noté $|\uparrow\rangle$.

Comparons comment la mécanique bohmienne et l'interprétation orthodoxe proposent de résoudre le cas d'un électron dont l'état initial de spin est $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$ et qui est mesuré par une tel appareil[29]. Pour un physicien qui adopte la mécanique bohmienne, la propriété de spin se réduit à une propriété spatiale face à un certain appareil de mesure. Il commence par considérer la position initiale de l'électron par rapport à l'extension spatiale de la fonction d'onde initiale. Il montre que, si la position initiale de l'électron est dans la partie supérieure de cette extension spatiale, alors sa trajectoire finira par arriver dans la branche supérieure en sortie de l'appareil, de sorte que l'électron sera étiqueté de spin $|\uparrow\rangle$. Réciproquement, si sa position est

[29]Pour la justification de la validité du raisonnement concernant la mécanique bohmienne, je renvoie à Albert (1992), p. 145-147.

dans la partie inférieure, alors il sortira par la branche inférieure et sera caractérisé comme de spin $|\downarrow\rangle$. Comme l'électron a initialement 50 % de chance d'être dans la partie supérieure ou inférieure de l'extension spatiale de la fonction d'onde initiale, on en déduit que le résultat de la mesure est $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$ avec une probabilité 1/2.

D'un autre côté, pour un physicien qui adopte l'interprétation orthodoxe, le spin est une propriété intrinsèque de l'électron. Il raisonne de la façon suivante. Un électron dans un état de spin $|\uparrow\rangle$ se retrouvera dans la branche supérieure en sortie de l'appareil, et un électron dans un état $|\downarrow\rangle$ se retrouvera dans la branche inférieure. Pour un électron dans l'état superposé initial $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$, la superposition est maintenue en sortie de l'appareil. Les détecteurs en sortie de l'appareil conduisent à une réduction aléatoire de l'état sur l'une ou l'autre des deux composantes, de sorte que le résultat de la mesure est $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$ avec une probabilité 1/2. On remarque que ces deux résolutions conduisent aux mêmes prédictions probabilistes, ce qui témoigne de leur équivalence.

Cet exemple permet d'illustrer le fait que les motifs d'explication dépendent de l'interprétation quantique adoptée. Soit le phénomène suivant à expliquer : sachant que l'électron était initialement dans l'état de spin $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$, la mesure de son spin donne le résultat $|\uparrow\rangle$. Je vais comparer les explications que proposent les interprétations bohmienne et orthodoxe. Pour la mécanique bohmienne, une explication prend la forme suivante : la position de l'électron était initialement dans la partie supérieure de l'extension spatiale de la fonction d'onde ; en raison de la dynamique de la fonction d'onde, il se retrouve dans la branche supérieure de l'appareil de Stern-Gerlach ; il est donc qualifié de « vers le haut ». Selon l'interprétation orthodoxe, l'explication est : l'électron est dans une superposition pendant sa traversée de l'appareil ; une réduction se produit dans le détecteur final, qui donne avec une égale probabilité (objective) un résultat $|\uparrow\rangle$ ou $|\downarrow\rangle$; il se trouve que dans ce cas c'est le résultat $|\uparrow\rangle$ qui est obtenu.

Ces explications mettent en jeu des motifs d'explication très différents. Elles ne portent pas sur la même propriété (bien qu'elle ait à chaque fois le nom de « spin ») : selon l'une, il s'agit d'une propriété qui se réduit à la position spatiale de l'électron relativement à l'appareil de mesure ; selon l'autre, il s'agit d'une propriété intrinsèque à l'électron, mais qui n'est pas définie en toute circonstance. Les deux explications ne partent pas des mêmes prémisses : l'une considère la position initiale de l'électron, tandis que l'autre ne fait rien de tel. Les lois utilisées ne sont pas les mêmes : l'interprétation bohmienne convoque l'équation de Schrödinger et l'équation guidante pour la position de l'électron, tandis que l'interprétation orthodoxe considère l'équation de Schrödinger et le postulat de projection. Les lois de la mécanique bohmienne sont

déterministes, tandis que l'interprétation orthodoxe utilise une loi indéterministe. Ces lois ne sont pas convoquées à la même place dans l'explication : l'équation guidante est employée au cours du déplacement de l'électron, tandis que le postulat de réduction de l'état est employé à la toute fin de l'expérience. Ainsi, cet exemple illustre le fait que les motifs d'explication bohmiens et orthodoxes peuvent être différents. De façon générale, le motif d'explication qui sous-tend un raisonnement dépend de l'interprétation adoptée.

1.4 Les informateurs crédibles

Je considère dans cette section une autre composante de la pratique scientifique : les informateurs crédibles, c'est-à-dire des scientifiques spécialistes susceptibles de fournir aux autres des informations fiables sur un élément particulier de connaissance. Comme précédemment, je vais montrer que les informateurs reconnus par un scientifique dépendent de l'interprétation qu'il adopte.

Tout d'abord, dès que l'élément de connaissance a trait de près ou de loin à l'interprétation de la théorie, il est assez clair que les physiciens se tourneront vers des informateurs différents, en fonction de l'interprétation qu'ils adoptent eux-mêmes. Par exemple, les physiciens qui adoptent (souvent implicitement) l'interprétation orthodoxe feront confiance aux manuels orthodoxes (souvent, les seuls qu'ils connaissent), rédigés par des scientifiques eux-mêmes orthodoxes. C'est ainsi qu'ils y liront que le monde quantique est fondamentalement indéterministe, et que les particules ne passent pas par un trou particulier lors de l'expérience des fentes d'Young. Inversement, un physicien qui adopte l'interprétation bohmienne consultera le manuel bohmien de Dürr et Teufel (2009). Il y apprendra que le monde est d'apparence indéterministe mais fondamentalement déterministe, et que les particules passent en réalité par l'un des deux trous d'Young.

Inversement, considérons un physicien qui est célèbre pour avoir réalisé un travail novateur et central dans un domaine. Sera-t-il considéré comme informateur crédible pour tous ses collègues ? Ici encore, tout dépend de la question considérée. Si elle a un penchant interprétatif, le physicien ne sera peut-être pas tenu comme informateur crédible, malgré sa célébrité. Prenons le cas du physicien David Deutsch, qui a formulé le premier algorithme quantique à être plus rapide qu'un algorithme classique (Deutsch, 1985). On dit qu'un algorithme est quantique s'il s'appuie sur le formalisme de la théorie quantique (il manipule un état de l'espace de Hilbert) ; il peut ainsi tirer parti des lois quantiques. Or il est bien connu que Deutsch est un adepte et un défenseur de

l'interprétation des mondes multiples. Son article de 1985 contient des arguments en faveur de cette interprétation quantique, et il est écrit avec certains de ses éléments de langage. Il a aussi publié des livres plus généralistes (Deutsch, 1997 et 2011) où il défend l'interprétation des mondes multiples. Selon lui, cette interprétation est la seule à pouvoir expliquer de manière satisfaisante la grande rapidité des algorithmes quantiques, comparés aux algorithmes classiques. Sachant cela, un physicien à la recherche d'une information sur les algorithmes quantiques ne considérera pas Deutsch comme un informateur crédible sur toutes les questions. S'il s'agit de savoir quel est l'algorithme en question, ou quels sont aujourd'hui les algorithmes quantiques pertinents, alors il pourra effectivement s'adresser à Deutsch. Mais s'il veut savoir *pourquoi* les algorithmes quantiques sont plus rapides que les algorithmes classiques, il ne se tournera vraisemblablement pas vers Deutsch, à moins qu'il ne soit lui-même everettien. Il ira plutôt demander à d'autres scientifiques, ou philosophes des sciences, qui lui apporteront d'autres réponses : par exemple Jozsa ou Bub. L'explication de la plus grande vitesse des algorithmes quantiques n'est en effet pas consensuelle, que ce soit dans la communauté physicienne ou philosophique. Ainsi, Deutsch servira d'informateur crédible sur certaines questions portant sur les algorithmes quantiques, mais peut-être pas sur d'autres, selon que le scientifique lui-même adopte l'interprétation des mondes multiples. Cela illustre le fait qu'un scientifique considérera des informateurs différents sur certaines questions, en fonction de l'interprétation qu'il adopte.

1.5 Expérimentation et observation

Dans cette section, je considère une autre composante de la pratique scientifique (la sixième dans la définition de Kitcher) : les exemples-types d'expérimentation et d'observation. Il s'agit de la disposition des scientifiques à conduire leurs expériences d'une certaine façon, qui peut servir de modèle à leurs collègues. Contrairement à toutes les autres composantes de la pratique scientifique, je ne vais pas chercher à montrer que celle-ci dépend de l'interprétation adoptée.

Il semble en effet que, lorsque les physiciens utilisent des interprétations quantiques différentes, ils conduisent les expériences de la même façon. Même s'ils interprètent différemment l'expérience et son résultat, ils considèrent le même phénomène et ils s'accordent sur la façon de l'étudier. Dans l'exemple de la mesure du spin de la section 1.3, les deux scientifiques orthodoxe et bohmien n'ont aucun désaccord sur le fait d'utiliser le même appareil de Stern-Gerlach, les mêmes capteurs en sortie, ni

sur la façon de lire les observations ou de considérer ce qui vaut comme un résultat de mesure. Cet accord entre eux était implicite dans ma présentation de l'exemple. Ainsi, les scientifiques se comportent de la même façon au laboratoire et ils proposent des expériences identiques quelle que soit l'interprétation qu'ils adoptent. Cela est un point d'accord central dans la pratique scientifique — et pour l'instant, le seul qui soit acquis. Cela fournit un terrain de comparaison expérimentale entre les différentes interprétations quantiques, et rend cette comparaison particulièrement aisée.

Considérons enfin la dernière composante de la pratique scientifique selon Kitcher, la méthodologie du scientifique, c'est-à-dire sa conception de ce qui constitue une bonne inférence ou un raisonnement approprié. Il me semble ici aussi que cette composante ne variera pas avec l'interprétation quantique adoptée. Par exemple, les mêmes lois de transitions atomiques peuvent être inférées à partir des mêmes données expérimentales, quelle que soit l'interprétation quantique considérée.

1.6 La notion de « pratique suggérée par une interprétation »

Récapitulons ce que les sections précédentes 1.1 à 1.5 ont montré. En examinant tour à tour les composantes de la pratique scientifique au sens de Kitcher, j'ai montré qu'elles peuvent dépendre fortement de l'interprétation adoptée par le scientifique (à l'exception de ce qui concerne l'expérimentation et l'observation, et la méthodologie).

Trois remarques méritent d'être faites. La première est que l'adoption d'une interprétation *peut* conduire à une certaine pratique scientifique, mais elle ne l'impose pas au scientifique. J'ai en effet indiqué qu'« adopter » une interprétation peut être une attitude seulement pragmatique, une hypothèse de travail. Cela n'engage pas le scientifique à suivre sur tous les points ce que l'interprétation suggère. Un scientifique peut aussi préférer une certaine interprétation pour l'image du monde qu'elle fournit, mais ne pas adopter complètement la pratique qu'elle suggère. En montrant que les pratiques scientifiques peuvent dépendre de l'interprétation adoptée, je ne me suis d'ailleurs pas prononcé sur le fait que les diverses pratiques soient effectivement beaucoup employées dans la recherche contemporaine. J'ai indiqué en introduction que je réserve cette question pour la section 3.

Tous les exemples que j'ai donnés ont consisté à montrer que certaines composantes de la pratique sont suggérées par une interprétation et pas par une autre. Par le terme de « suggéré », je veux dire que certains éléments de la pratique sont liés plus fortement à cette interprétation : par exemple, tel énoncé emploie le concept de l'interprétation, ou tel informateur crédible revendique cette interprétation. Cela

indique que chaque interprétation suggère certaines pratiques (ou des composantes de la pratique) à l'exclusion d'autres. J'en viens à définir de façon générale la *pratique suggérée par une interprétation* ainsi : il s'agit de la pratique scientifique dont chacune des composantes est celle suggérée par l'interprétation en question, c'est-à-dire qui est liée fortement à cette interprétation. En quelque sorte, il s'agit de la pratique qu'adopterait un physicien qui ne connaîtrait qu'une seule interprétation. Par exemple, la pratique suggérée par l'interprétation bohmienne (en abrégé : la pratique bohmienne) comprend, entre autres, les différents éléments présentés au fil des sections précédentes : les variables de position des particules Q_k et l'équation guidante, l'intérêt pour la non-localité et les trajectoires bohmiennes, etc. Dans la réalité, il est fort probable que les physiciens, même les adeptes d'une interprétation particulière, n'adoptent pas rigidement la pratique suggérée par une seule interprétation, mais aient une pratique constituée de mélanges à partir de pratiques suggérées par plusieurs d'interprétations.

Une troisième remarque concerne le rapport entre les pratiques suggérées par des interprétations différentes. Dans les sections précédentes, je me suis concentré sur les *différences* entre les pratiques suggérées par les interprétations. Cela ne préjuge pas du fait qu'il puisse exister des pratiques compatibles avec plusieurs interprétations différentes. En d'autres termes, les pratiques suggérées par les différentes interprétations quantiques ne sont pas nécessairement exclusives les unes des autres. J'étudierai d'ailleurs dans le chapitre suivant tout ce qu'elles ont en commun. Je me suis ici concentré sur leur diversité, car c'est ce qui est souvent négligé.

1.7 Existe-t-il une pratique interprétativement neutre ?

Si chaque interprétation quantique suggère une pratique scientifique particulière, existe-t-il inversement une pratique scientifique qui ne soit liée à aucune interprétation particulière et qui pourrait se revendiquer interprétativement neutre ? C'est la question que cette section aborde. L'expression « interprétativement neutre » signifie ici : qui ne prenne parti vis-à-vis d'aucune interprétation quantique. Cela peut se réaliser de deux façons différentes : ou bien la pratique scientifique (qui se veut neutre) n'a rien de commun avec les pratiques suggérées par les différentes interprétations, ou bien au contraire elle est incluse dans toutes ces pratiques différentes et il s'agit d'une pratique commune, suggérée par toutes les interprétations. Dans les deux cas, une telle pratique ne présenterait aucune préférence envers l'une ou l'autre des interprétations. Certains scientifiques et certains philosophes affirment parfois (implicitement)

qu'il est possible d'énoncer ou d'utiliser la théorie de la mécanique quantique sans choisir une interprétation particulière[30]. On peut considérer que le but de cette section est d'examiner cette affirmation. S'il existait une pratique interprétativement neutre, cela présenterait par exemple l'avantage d'éviter aux physiciens de s'engager dans les débats interprétatifs, ou peut-être de mieux se faire comprendre par leurs collègues. À l'inverse, s'il n'existait pas de telle pratique neutre, cela obligerait les physiciens à prendre parti pour une interprétation particulière dans leurs recherches, même de façon seulement implicite. Surtout, leur pratique scientifique serait nécessairement toujours influencée par une interprétation, même s'ils ne s'en rendent pas compte. La thèse que je défends ici est qu'il n'est pas possible de définir une pratique scientifique qui soit interprétativement neutre.

J'ai déjà établi au chapitre 2, section 4.3, qu'il n'est pas possible d'appliquer empiriquement la mécanique quantique sans faire un choix interprétatif, qu'il s'agisse de l'objet des prédictions ou de ce qui constitue un fait expérimental. Cela pourrait suffire à conclure ici qu'il n'existe pas de pratique neutre vis-à-vis des interprétations quantiques. Par souci de clarté, je vais mener rapidement la discussion sur les principales composantes de la pratique scientifique. Considérons tout d'abord le langage employé par les physiciens. Rappelons que tout symbole ou terme de ce langage doit être interprété pour acquérir une signification, ce qui est requis pour que les scientifiques puissent employer le langage[31]. Puisqu'il concerne la mécanique quantique, ce langage doit contenir des termes comme « probabilité » ou « fonction d'onde ψ ». Or les interprétations quantiques (orthodoxe, bohmienne, everettienne) divergent sur la signification de ces termes — c'est certainement là que leurs différences sont les plus grandes. Par conséquent, il n'est pas possible d'imaginer une interprétation de ces termes qui n'entre pas en conflit avec au moins l'une ou l'autre de ces interprétations. Il n'existe donc pas de langage de la mécanique quantique qui soit neutre vis-à-vis des interprétations quantiques. Tout au mieux existe-t-il un ensemble de symboles mathématiques et de termes qui sont employés par tous, mais sans que le sens qui leur est donné ne soit identique.

Considérons une autre composante de la pratique scientifique : les énoncés acceptés par les scientifiques. Il n'en existe pas non plus qui soient neutres, simplement en vertu

[30] C'est le cas par exemple de Wallace (2008, p. 21), qui semble indiquer que l'algorithme quantique qu'il présente est interprétativement neutre. Cf. à ce sujet mes remarques p. 56.

[31] On pourrait objecter que les scientifiques pourraient aussi travailler sur un ensemble de termes non-interprétés, par exemple des symboles mathématiques. Ils prouveraient alors des résultats formels sur des modèles mathématiques. Mais il ne semble pas du tout que cela constitue une activité de recherche répandue. Les physiciens commentent toujours la signification des résultats qu'ils obtiennent.

du fait qu'il n'existe pas de langage lui-même neutre. D'ailleurs, à quoi ressemblerait un énoncé interprétativement neutre de la théorie de la mécanique quantique ? Le chapitre 2 a déjà montré que les interprétations quantiques ne reconnaissent pas les mêmes faits à propos d'une expérience. Considérons l'expérience de mesure du spin d'un électron (cf. aussi la section 1.3). À la question : « le spin est-il mesuré en haut ou en bas ? », on ne peut pas fournir un énoncé qui ne prendrait pas position vis-à-vis des interprétations. Si on répond que le spin a été mesuré « en haut », ou qu'il a été mesuré « en bas », on sera en désaccord avec l'interprétation d'Everett qui considère que les deux se sont réalisés, et non pas seulement un seul. Tout énoncé concernant les faits expérimentaux sera nécessairement en désaccord avec au moins une interprétation. Il n'y a donc pas de neutralité possible ici non plus.

Considérons à présent les raisonnements (la méthodologie) que les scientifiques peuvent utiliser. Le raisonnement emploiera un langage, des concepts, des énoncés qui ne peuvent eux-mêmes pas être neutres (dans l'exemple de la mesure du spin de la section 1.3, à quoi pourrait ressembler un raisonnement neutre ?).

Il me semble qu'il existe deux exceptions au fait que les composantes de la pratique scientifique ne soient pas neutres. Tout d'abord, il y a le cas des exemples-types d'expérimentation et d'observation, et la méthodologie scientifique : j'ai indiqué dans la section 1.5 qu'ils constituent les seules composantes à ne pas dépendre de l'interprétation quantique adoptée. Ensuite, certaines questions significatives peuvent être neutres, au sens où elles sont considérées par les scientifiques qui adoptent des interprétations différentes. Par exemple, élaborer des algorithmes quantiques performants est une question considérée comme pertinente par des physiciens qui adoptent n'importe quelle interprétation : nous avons vu que Deutsch, un des pionniers du domaine, défend l'interprétation des mondes multiples ; Jozsa, qui a contribué à améliorer l'algorithme initial de Deutsch (Deutsch et Jozsa, 1992), adopte une interprétation en terme d'information[32] ; Simon (1994) adopte une approche d'informatique théorique[33] ; Shor (1994) a adopté l'interprétation des mondes multiples et aussi l'interprétation orthodoxe[34] ; Griffiths (Griffiths et Niu, 1996) est un des artisans de l'interprétation des histoires décohérentes[35] (je présenterai davantage ces travaux dans la section 3.1).

[32]Il en est un défenseur, par exemple dans Jozsa (2004), p. 85 : « Dans cet article nous avons défendu un point de vue qui tente de mettre une notion d'information à un niveau réellement fondamental dans la formulation de la physique quantique ».

[33]Simon dit : « J'abordais le problème avec une perspective purement d'informatique théorique. » (cité par Fuchs, lors d'une communication personnelle, mai 2010).

[34]Cf. Shor *in* Aaronson (2007), commentaire 38.

[35]Je n'ai pas présenté cette interprétation dans le chapitre 2. Des références sont Omnès (1999) et Griffiths (2003).

Tous s'intéressent à la question significative suivante : quels sont les algorithmes qui reposent sur la théorie quantique et qui sont plus rapides que les algorithmes classiques ?[36]

Cette discussion montre qu'il ne peut pas exister de pratique neutre vis-à-vis des différentes interprétations quantiques. Tout au mieux, une ou deux composantes peuvent être en partie neutres, mais il ne s'agit pas des composantes principales (le langage, les énoncés, les motifs d'explication...). Il n'y a, en tout cas, pas de pratique scientifique *complète* qui soit neutre, c'est-à-dire qui dont aucune composante ne soit réduite à néant. Par conséquent, les scientifiques sont contraints — même involontairement — de prendre parti dans leurs travaux de recherche entre les différentes interprétations, et cela influence probablement leurs travaux.

Les scientifiques ont néanmoins souvent le sentiment de travailler ou de publier en étant interprétativement neutre. Il me semble que cette illusion est due au fait qu'ils utilisent dans ce cas l'interprétation orthodoxe dans sa version minimale[37]. Pourquoi considèrent-ils à tort qu'elle est neutre ? Je vois trois raisons à cela. La première est qu'elle est minimale : elle fait très peu d'engagements interprétatifs ; elle suppose seulement qu'il existe des résultats de mesures et ne se prononce pas sur l'existence d'objets quantiques. Le fait qu'il y ait si peu de positions interprétatives peut faire oublier qu'il y en a tout de même. Peut-être ne se rendent-ils pas compte que d'autres interprétations quantiques ont des positions différentes — par exemple, l'interprétation d'Everett ne suppose pas qu'il existe de tels résultats de mesures. La deuxième raison est que l'interprétation orthodoxe minimale reste assez proche du sens commun. Par exemple, elle suppose qu'il existe des résultats de mesures et ses prédictions ne concernent pas les paris des agents. Enfin, elle peut être considérée comme neutre du point de vue social : la communauté physicienne considère que la façon par défaut de publier se fait avec l'interprétation orthodoxe minimale. Elle considère que quiconque s'en écarte prend un parti dans le débat interprétatif (je reviens sur ce constat dans la section 3.4).

Conclusion

Cette section a montré que la pratique scientifique, au sens de Kitcher, peut dépendre de l'interprétation quantique adoptée par les scientifiques. J'ai ainsi défini

[36] Noter que les questions significatives doivent être énoncées dans le langage courant et non pas dans les langages de chaque interprétation, sans quoi elles ne pourraient pas être exprimées de façon neutre (cela restreint fortement les questions possibles).

[37] J'ai présenté cette version minimale au chapitre 2, section 1.3.

la pratique scientifique que suggère une interprétation particulière. J'ai montré qu'il n'existe pas non plus de pratique scientifique neutre. Autrement dit, toute pratique scientifique doit être liée à une interprétation particulière. Il n'est pas possible d'étudier la pratique scientifique en mécanique quantique sans prendre en compte l'interprétation adoptée par les scientifiques, et aussi le fait qu'il existe une pluralité d'interprétations.

2 Les divers rôles en pratique d'une interprétation dans la réalisation d'un travail de recherche

Dans la section précédente 1, j'ai analysé comment une interprétation peut modifier la pratique scientifique. Je veux à présent réutiliser ces analyses tout en adoptant un point de vue. Au lieu d'étudier comment une interprétation modifie la pratique de façon générale, j'étudie quand et comment l'interprétation joue un rôle pour un travail de recherche donné. Par *travail* (ou *résultat*), j'entends un élément de connaissance produit par les scientifiques, qui correspond à un article publié dans les journaux scientifiques.

À travers les pratiques qu'elles suggèrent, les interprétations peuvent intervenir de multiples façons pour un travail donné. Je propose de les rassembler en deux groupes, en distinguant ainsi deux rôles en pratique pour les interprétations : d'une part, ce qui concerne la *production* d'un travail (section 2.1) et d'autre part, sa *publication* (section 2.2) (je dirai alors que telle interprétation « joue un rôle » dans la production ou dans la publication d'un travail donné). Les raisons d'un tel découpage sont les suivantes. Il recouvre la distinction entre ce qui est public et ce qui ne l'est pas. Ce qui est public, dans un article scientifique, est ce à quoi les autres scientifiques ont accès. La présence d'une interprétation particulière peut les attirer ou au contraire gêner leur compréhension. D'un autre côté, les scientifiques ont pu être influencés dans leur recherche par d'autres interprétations, qui n'apparaîtra pas dans leurs articles. Je montrerai des exemples où les scientifiques adoptent dans les articles qu'ils publient une pratique différente de celle qui a présidé à la réalisation de ces travaux. Il est donc important de ne pas se limiter à ce que les scientifiques choisissent de montrer publiquement et qui pourrait donner une apparence trompeuse. Le chapitre suivant donnera d'autres éléments pour la pertinence de cette distinction.

2.1 Dans la production d'un travail

Je m'intéresse dans cette section au fait que les interprétations peuvent jouer un rôle en pratique dans la production d'un travail. Il est utile de distinguer à l'intérieur de cela deux aspects : tout d'abord, une interprétation peut être une *incitation* à entreprendre des recherches sur le problème en question, qui conduira à produire le travail. Certains travaux ont effectivement été motivés initialement par une interprétation particulière. J'ai présenté de tels exemples dans la section 1.2, lors de la discussion des questions significatives : l'interprétation de Bohm a été une incitation pour les travaux de Bell (1964b), de Wiseman (2007) et de Kocsis *et al.* (2011).

Une interprétation peut jouer un autre rôle en pratique en étant une *aide* dans la réalisation du travail lui-même. Cela signifie que la pratique suggérée par cette interprétation a facilité la réalisation du travail en question pour le scientifique : s'il n'avait pas utilisé cette interprétation et donc la pratique suggérée, cela aurait été plus difficile pour lui de réaliser le travail (cette notion de difficulté peut être évaluée en terme d'heures de travail standard). Il faut noter qu'il s'agit d'une aide parmi d'autres, comme par exemple peut l'être la réutilisation d'un autre travail, ou la collaboration avec d'autres scientifiques : en aucun cas l'interprétation à elle seule, ou la pratique qu'elle suggère, ne résout directement le problème. Cette aide peut être dépendante du physicien considéré et faire intervenir des facteurs proprement idiosyncrasiques. Comme un exemple d'aide plus objectif, on peut citer le cas où la formulation mathématique particulière associée à l'interprétation simplifie l'énoncé et la résolution du problème. Dans le domaine du calcul quantique (dont j'ai déjà parlé à propos de Deutsch), le physicien Shor dit être parvenu à établir un algorithme quantique (Shor, 1994) grâce à l'interprétation orthodoxe et à celle des mondes multiples. Il dit qu'elles lui ont « permis de réfléchir plus facilement à [sa] recherche »[38]. On note au passage la possibilité que plusieurs interprétations jouent un rôle pour un même travail.

Il faut noter que, aussi bien pour le rôle d'aide que pour celui d'incitation, il s'agit de rôles qui sont liés à un contexte bien précis et qui sont contingents : on peut facilement imaginer d'autres circonstances (pour un autre physicien, dans un autre environnement de recherche) pour lesquelles une autre interprétation aurait tout aussi bien incité ou aidé à la production du travail en question. Affirmer qu'une interprétation a été une aide ou une incitation pour un travail donné n'est qu'un jugement historique et factuel, qui n'implique pas qu'une autre interprétation n'en aurait pas été capable.

[38] Cf. Aaronson (2007), commentaire 38.

Je propose de réexprimer le rôle que joue l'interprétation dans la production d'un travail à l'aide de la notion de *fécondation*. Je dis qu'une interprétation est *féconde* pour la production d'un travail si la pratique suggérée par cette interprétation permet ou facilite la production du travail pour le scientifique. Cela recouvre aussi bien l'aspect d'incitation que celui d'aide : dans les deux cas, le travail n'aurait pas été élaboré aussi facilement, ou simplement envisagé, sans la pratique de cette interprétation. Cette définition de la fécondation permet de considérer que l'interprétation est une *cause* de la production du travail, au sens contrefactuel : si l'interprétation n'avait pas été utilisée, la production du travail n'aurait pas eu lieu, ou aurait été plus difficile. Cette notion de fécondation sera centrale au chapitre suivant, dans lequel j'étudie d'autres cas de fécondation, de manière plus générale qu'avec les interprétations quantiques.

2.2 Dans la publication d'un travail

Les interprétations peuvent transparaître dans la version publiée des travaux, à travers la pratique qu'elles suggèrent. Par exemple, on peut trouver dans les articles les concepts de l'interprétation, la formulation mathématique associée, ou l'emploi d'un motif d'explication particulier. Dans son article de 1985 proposant un algorithme quantique, Deutsch utilise le vocabulaire des mondes multiples, avec des expressions tels que les « univers parallèles interférant » et le « parallélisme quantique »[39]. Il le reconnaît d'ailleurs :

> « J'ai adopté, lorsque nécessaire, l'ontologie d'Everett. »[40]

L'ontologie d'Everett est une autre expression pour l'interprétation des mondes multiples. Cependant, l'utilisation d'une interprétation et de la pratique scientifique qu'elle suggère est la plupart du temps implicite. J'ai indiqué par exemple que les physiciens emploient généralement l'interprétation orthodoxe (éventuellement dans sa version minimale) sans le revendiquer et peut-être sans s'en apercevoir eux-mêmes.

Une remarque doit être faite sur la façon dont on peut identifier l'interprétation qui intervient dans les rôles de production ou de publication. Il s'agit en général d'un exercice délicat, pour plusieurs raisons. D'une part, il existe pour chaque interprétation une multitude de versions différentes, aux frontières parfois floues, ainsi que je l'ai indiqué au chapitre 2 lorsque j'ai présenté des versions médianes, sans entrer dans les

[39] Deutsch (1985), respectivement p. 111 et p. 111-113.
[40] Deutsch (1985), p. 16.

variations proposées. Ainsi, il n'existe pas de liste définitive de mots-clés identifiables — il n'est malheureusement pas envisageable de procéder à une automatisation du traitement à partir de bases données. D'autre part, rien n'empêche la pratique des scientifiques de reposer sur un mélange de plusieurs interprétations. Ainsi, il semble que la pratique suggérée par l'interprétation des manuels s'insinue dans presque tous les travaux, appuyée sur l'algorithme prédictif. Ensuite, les pratiques suggérées par les diverses interprétations se recoupent parfois. C'est-à-dire que certains éléments de la pratique peuvent avoir été suggérées par plusieurs interprétations. Cela ne facilite pas l'identification de l'interprétation employée par le physicien. Enfin, si le rôle de publication doit pouvoir être déterminé par la lecture de l'article, il n'en est rien pour le rôle de « production », qui reste par définition potentiellement caché. Pour le déterminer, il est nécessaire de s'appuyer sur des travaux d'historiens ou d'interroger les scientifiques eux-mêmes, car il est rare qu'ils en fassent mention publiquement. D'ailleurs, il peut arriver que des scientifiques qui travaillent ensemble sur un même projet ne sachent pas quelle interprétation ses collègues préfèrent utiliser[41].

2.3 Formalisation

Dans la suite de ce travail, je vais donner des exemples de travaux scientifiques, en indiquant à chaque fois les interprétations qui ont joué un rôle dans leur production et leur publication. Comme je vais m'en resservir à plusieurs reprises, il s'avère utile d'abréger la notation. Je propose de formaliser de la façon suivante. Les travaux sont notés W, avec en indice la référence de l'article, par exemple $W_{\text{Bell 1964b}}$. Les interprétations sont notées I, avec en indice le nom courant de l'interprétation, ou une abréviation : I_{ortho} pour l'interprétation orthodoxe, I_{Everett} pour l'interprétation des mondes multiples d'Everett, I_{Bohm} pour la mécanique bohmienne, etc. Selon l'interprétation orthodoxe, la version minimale est notée $I_{\text{ortho min}}$; en général et par défaut, c'est cette version qui est utilisée par les physiciens. Mais lorsqu'ils expriment une certaine adhésion aux engagements interprétatifs de l'interprétation orthodoxe, au-delà de ce que propose la version minimale, je considère qu'ils utilisent I_{ortho} et pas $I_{\text{ortho min}}$. Pour un travail W, j'ai distingué deux façons dont une interprétation peut jouer un rôle en pratique : dans sa production et dans sa publication. Je les note de la manière suivante :

[41] L'exemple m'a été donné par John Sipe, professeur de Physique à l'Université de Toronto (communication personnelle, mai 2010).

$$W(I_{\text{production}}, I_{\text{publication}}) \tag{4.1}$$

pour indiquer que $I_{\text{production}}$ est l'interprétation qui a eu un rôle dans la production du travail (comme incitation ou comme aide) et que $I_{\text{publication}}$ est l'interprétation qui a eu un rôle dans la publication du travail.

Par exemple, pour l'article de Deutsch de 1985, c'est l'interprétation d'Everett qui a servi à la fois pour sa production et sa publication :

$$W_{\text{Deutsch 1985}}(I_{\text{Everett}}, I_{\text{Everett}}). \tag{4.2}$$

J'ai indiqué dans la section 1.2 que les inégalités de Bell ont été suggérées par l'interprétation de Bohm. L'interprétation orthodoxe et une interprétation réaliste locale (celle-là même qui y est discutée, celle proposée par l'article d'EPR) ont été utilisées à la fois dans la production et la publication. Comme plusieurs interprétations interviennent pour le même rôle, on les note avec un « + » :

$$W_{\text{Bell 1964b}}(I_{\text{Bohm}} + I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}). \tag{4.3}$$

Pour son algorithme quantique de 1994, Shor s'est appuyé sur les interprétations des mondes multiples et orthodoxe ; l'article lui-même n'emploie que l'interprétation orthodoxe :

$$W_{\text{Shor 1994}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \tag{4.4}$$

3 La pluralité des interprétations dans la pratique scientifique

Dans les sections précédentes, j'ai montré que les interprétations *peuvent* jouer des rôles dans la recherche, à travers les pratiques scientifiques qu'elles suggèrent. J'ai aussi montré que les interprétations *doivent* jouer de tels rôles, dans la mesure où il n'existe pas de pratique scientifique interprétativement neutre. Quelques exemples ont été donnés à titre d'illustration, mais je ne me suis pas occupé d'établir si les diverses pratiques interprétatives sont effectivement beaucoup utilisées. Il se pourrait qu'une seule pratique scientifique, par exemple la pratique orthodoxe, soit utilisée par les physiciens. Dans ce cas, la pluralité des interprétations quantiques ne se traduirait pas dans la pratique, et resterait de l'ordre du théorique. Cette section veut considérer cette question et établir si la pluralité des interprétations intervient dans

la pratique scientifique. Il s'agit de préciser l'ampleur du phénomène dont j'ai établi la possibilité et que j'ai caractérisé : la pluralité des pratiques liées aux interprétations est-elle significative ? Je vais montrer qu'il faut répondre par l'affirmative à cette question. Je présente pour cela le cas de travaux célèbres et significatifs qui ont mis en jeu des pratiques d'interprétations variées. Je prends ces exemples dans deux domaines : le calcul quantique et les fondements de la théorie autour du théorème de Bell (respectivement sections 3.1 et 3.2). Je m'intéresse ensuite plus spécialement aux travaux réalisés en collaboration (section 3.3). Enfin (section 3.4), j'étudie le fait que l'interprétation orthodoxe, dans sa version minimale, est presque toujours employée dans la publication des travaux. Pour les exemples que je réutilise dans le prochain chapitre, je les note avec la formalisation de la section précédente.

En voulant faire reconnaître la place des interprétations dans la pratique scientifique, je veux me tenir éloigné de deux positions extrêmes. La première serait que les diverses interprétations n'existent que pour les discussions philosophiques (qu'elles soient le fait de philosophes ou de physiciens professionnels) et n'ont aucune place en réalité dans la pratique de la recherche. À l'autre extrême, une autre position considérerait que tout article de mécanique quantique met en jeu de manière très forte et spécifique une interprétation particulière dans chacun des rôles de production et de publication. Ma position sera intermédiaire : je défendrai la thèse selon laquelle, si la pratique scientifique est assez généralement inspirée de l'interprétation orthodoxe, il existe néanmoins tout un ensemble de travaux de premier ordre, dans différents domaines de recherche, qui ont mis en jeu une réelle pluralité de pratiques liées à des interprétations différentes. Il faut noter dès à présent que la pluralité des pratiques concerne surtout le rôle de production d'un travail et figure plus rarement dans la publication. La section 3.4 étudie le fait que la version minimale de l'interprétation orthodoxe est presque toujours utilisée dans la publication des travaux. Il ne faudrait pas que, s'arrêtant à ce constat, on en déduise un peu vite que les interprétations ne jouent aucun rôle dans la production des différents travaux.

3.1 Exemples dans le domaine du calcul quantique

Des scientifiques avec des interprétations fort variées travaillent dans le domaine du calcul quantique, qui consiste à élaborer des algorithmes tirant parti du formalisme de la mécanique quantique. Je vais montrer que les pratiques liées à ces interprétations sont significatives, en considérant tour à tour plusieurs des premiers algorithmes importants : Deutsch (1985), Deutsch et Jozsa (1992), Berthiaume et Brassard (1994),

Simon (1994), Shor (1994).

L'article de Deutsch de 1985 présentait le premier algorithme quantique, pour la transformée de Fourier sur $\mathbb{Z}_{2^n}$, le groupe additif des entiers modulo n. S'il est en moyenne aussi rapide que les algorithmes classiques, il peut en certains occasions être plus rapide, mais il y a une probabilité que l'algorithme échoue à donner une réponse. J'ai indiqué qu'on peut noter :

$$W_{\text{Deutsch 1985}}(I_{\text{Everett}}, I_{\text{Everett}}). \tag{4.5}$$

Une généralisation en fut proposée en 1992, par un travail commun de Deutsch et Jozsa : le nouvel algorithme quantique donne une réponse avec certitude et est plus rapide que tout algorithme classique. J'ai indiqué que Deutsch adopte l'interprétation des mondes multiples, tandis que Jozsa adopte une interprétation informationnelle ($I_{\text{information}}$). Il est d'ailleurs absolument contre l'interprétation des mondes multiples. Certainement à cause des positions opposées des deux scientifiques, l'article n'est pas rédigé dans les termes de l'une ou l'autre des interprétations, mais plutôt avec une interprétation orthodoxe minimale. On note :

$$W_{\text{Deutsch Jozsa 1992}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{information}}, I_{\text{ortho min}}) \tag{4.6}$$

En 1994, Berthiaume et Brassard proposent un algorithme quantique qui peut résoudre des problèmes de décision avec une efficacité exponentielle par rapport aux algorithmes classiques. Brassard adopte une interprétation en terme d'information[42], mais elle ne filtre pas dans l'article, qui est écrit avec une interprétation orthodoxe[43]. On note :

$$W_{\text{Berthiaume Brassard 1994}}(I_{\text{information}}, I_{\text{ortho}}) \tag{4.7}$$

En 1994, Simon proposa un algorithme quantique efficace pour trouver la période cachée d'une fonction. Il aborde le problème en tant qu'informaticien théorique, en ayant appris le minimum de physique[44]. On peut considérer qu'il utilise une interpré-

[42] Cf. Brassard (2005).

[43] Je considère qu'il s'agit de l'interprétation orthodoxe et non pas de sa version minimale car l'article contient plusieurs allusions à des positions orthodoxes assez fortes, concernant la réduction de la fonction.

[44] « J'ai appris vraiment le strict minimum de physique dont j'avais besoin pour être capable de comprendre les questions d'informatique théorique. » (Simon, cité par Fuchs, communication personnelle, mai 2010.

tation minimale, proche de celle qui est orthodoxe :

$$W_{\text{Simon 1994}}(I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \tag{4.8}$$

Après quoi, Shor (1994) généralisa cet algorithme pour le problème de la factorisation et des logarithmes discrets, qui deviennent ainsi des problèmes solubles en temps polynomial[45]. On a (cf. section 2.3)

$$W_{\text{Shor 1994}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}). \tag{4.9}$$

Griffiths et Niu (1996) ont proposé une reformulation de cet algorithme (avec des portes quantiques à 1 bit au lieu de 2 et des mesures intermédiaires au lieu d'une seule à la fin). Nous avons vu que Griffiths est un des créateurs de l'interprétation des histoires décohérentes ; Niu utilise l'interprétation orthodoxe[46]. Il est vraisemblable que le projet de procéder à des mesures intermédiaires ait été suggéré par le point de vue des histoires décohérentes. L'article, et tout particulièrement la justification de l'équivalence du nouvel algorithme avec l'ancien, est écrit dans les termes de l'interprétation des histoires décohérentes[47]. Noter que l'article de Griffiths et Niu (1996) n'est pas seulement la réexpression de l'algorithme de Shor dans les termes de l'interprétation des histoires cohérentes de Griffiths, mais il constitue bien un nouveau résultat — qui peut s'exprimer dans toutes les interprétations — ainsi qu'ils le défendent (p. 2) : il met en jeu un nouveau mode de calcul quantique, avec des mesures intermédiaires qui viennent influencer une étape ultérieure de calcul ; l'algorithme n'emploie que des portes à 1 bit au lieu de 2, ce qui le rend plus simple. L'article est rédigé avec l'interprétation des histoires décohérentes :

$$W_{\text{Griffiths Niu 1996}}(I_{\text{hist décoh}} + I_{\text{ortho}}, I_{\text{hist décoh}}) \tag{4.10}$$

Enfin, une implémentation expérimentale (de manière optique) de l'algorithme de Deutsch-Jozsa a été réalisée par Tame *et al.* (2007) dans l'équipe de Zeilinger, lequel est un défenseur de l'interprétation de Copenhague, dans une version informationnelle (Zeilinger 1996, 1999). On a ainsi :

[45] Shor (1997) est une version étendue de ce résultat, incluant des discussions.

[46] Cf. Fuchs, communication personnelle, mai 2010.

[47] L'article précise d'ailleurs : « Les lecteurs qui ne sont pas familiers avec les règles [utilisées dans cette explication] sont invités à se reporter à la littérature correspondante » (p. 4), et ils citent les articles fondateurs de cette interprétation.

$$W_{\text{Tame et al. 2007}}(I_{\text{ortho}}, I_{\text{ortho}}) \tag{4.11}$$

On peut noter, à titre sociologique, que les positions professionnelles sont très diverses également : il s'agit de positions académiques dans des champs disciplinaires divers (cryptographie pour Brassard, calcul quantique pour Deutsch, informatique pour Simon), ou d'emplois dans la recherche industrielle (laboratoires AT&T pour Shor, Microsoft aujourd'hui pour Simon).

3.2 Exemples dans le domaine des fondements de la mécanique quantique : autour de la question des « variables cachées »

Voici un second domaine de recherche dans lequel on trouve de nombreux exemples de travaux pour lesquels les interprétations ont joué un rôle en pratique : les fondements de la mécanique quantique et plus particulièrement autour de la question des « variables cachées ». Un article fondateur est celui d'Einstein, Podolski et Rosen (1935), dont j'ai déjà parlé à la section 1.2. Ils présentent un paradoxe en vue de montrer que la mécanique quantique n'est pas complète, en un sens réaliste qu'ils spécifient. Pour atteindre leur conclusion, ils supposent une certaine sorte de localité, qui s'exprime sous la forme d'une absence d'interaction. Je note leur interprétation $I_{\text{réaliste locale}}$: c'est celle qui suscite et aide la réalisation de leur travail et qui transparaît dans leur article. L'article utilise également l'interprétation orthodoxe, à titre de repoussoir. On note :

$$W_{\text{EPR 1935}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}) \tag{4.12}$$

Dans un article de 1957, Aharonov et Bohm proposent une reformulation du paradoxe EPR au moyen d'une expérience plus facilement réalisable, la grandeur mesurée étant la polarisation de photons. Ils proposent cela afin de réinterpréter une expérience effectuée plus tôt avec d'autres buts (Wu et Shaknov, 1950). Leur but est de montrer que les prédictions de la mécanique quantique sont vérifiées dans la configuration expérimentale qu'invoquent EPR. Si tel est le cas, cela permet d'affirmer que le paradoxe EPR est bien légitime. Pour ce qui m'intéresse ici, je note qu'Aharonov et Bohm discutent notamment dans leur article de l'interprétation causale de la mécanique bohmienne (p. 1072) comme une des solutions possibles au paradoxe — après qu'ils aient présenté la réponse de Bohr comme insatisfaisante. On peut ainsi voir leur article comme une façon de re-légitimer l'interprétation causale de Bohm et les

explications qu'elle fournit. L'article est écrit à la fois avec l'interprétation orthodoxe et l'interprétation bohmienne ; les deux ont aidé à sa production. On note :

$$W_{\text{Bohm Aharonov 1957}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}) \tag{4.13}$$

Une trentaine d'années après le paradoxe EPR, Bell prouva le résultat étonnant selon lequel les hypothèses d'EPR n'étaient pas cohérentes avec les prédictions de la mécanique quantique. Il réutilisa pour cela l'argument d'EPR dans la situation proposée par Bohm et Aharonov. Schématiquement, l'hypothèse coupable fut identifiée comme étant la localité (mais cf. ma note 9 p. 133).

Un article de Clauser, Horne, Shimony et Holt (appelé CHSH, 1969) proposa une expérience permettant de tester les inégalités de Bell. Clauser était venu à s'intéresser aux inégalités de Bell notamment à cause de ses lectures de Bohm[48] ; il était un partisan des variables cachées et pariait d'ailleurs (500 $) que la mécanique quantique allait être défaite. À l'inverse, Holt et Shimony pensaient que la mécanique quantique allait être vérifiée[49] ; néanmoins, Shimony était critique de l'interprétation de Copenhague dominante[50]. C'est plutôt l'interprétation orthodoxe minimale qui est utilisée dans l'article, ainsi qu'une interprétation réaliste locale. On note

$$W_{\text{CHSH 1969}}(I_{\text{ortho min}} + I_{\text{Bohm}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho min}} + I_{\text{réaliste locale}}) \tag{4.14}$$

Plusieurs expériences sont ensuite menées pour tester les inégalités de Bell[51] et elles se prononcent en faveur de la mécanique quantique. Néanmoins, certaines échappatoires peuvent être imaginer qui expliqueraient comment une théorie à variables cachées locales donnerait l'apparente absence de contradiction avec la mécanique quantique. C'est une expérience décisive d'Aspect, Dalibard et Roger (1982) qui permis d'écarter un échappatoire important, celui de la communication (« the communication loophole »). Aspect adopte l'interprétation orthodoxe[52]. On note :

$$W_{\text{Aspect et al. 1982}}(I_{\text{ortho}}, I_{\text{ortho}}). \tag{4.15}$$

[48] Cf. Freire (2009), p. 283 et Clauser (2002).

[49] Cf. Freire (2009), p. 283 et Shimony (2002).

[50] « Bell, Clauser et Shimony étaient critiques de ce qu'ils comprenaient comme étant l'interprétation de la complémentarité de Bohr. », Freire (2009), p. 283.

[51] Un aperçu en est par exemple donné par Redhead (1987), p. 107-113.

[52] « Aspect n'avait pas de querelle philosophique particulière avec cette interprétation [de Copenhague] en elle-même. », Freire (2006), p. 611

Les exemples tirés de ces deux domaines de recherche (calcul quantique et fondements de la théorie) ont illustré que des pratiques issues d'interprétations différentes ont joué des rôles dans des travaux majeurs — ceux qui ont été présentés sont probablement les plus importants de leur domaine. La section suivante développe un point spécifique : le cas des travaux réalisés en collaboration.

3.3 Exemples de travaux en collaboration

Dans cette section, je continue d'illustrer le fait que les diverses interprétations quantiques sont utilisées dans la recherche contemporaine. Je propose un autre genre d'exemples, avec des travaux où la pluralité des interprétations existe au sein même d'un unique travail. Il s'agit de travaux réalisés grâce à une collaboration entre scientifiques dont la pratique est issue d'interprétations différentes. Cela indique que les diverses pratiques interprétatives peuvent coexister non à la fois du point de vue scientifique comme de celui des relations humaines. Le premier exemple est celui de Deutsch et Jozsa (1992), que j'ai déjà évoqué. Deutsch est partisan de l'interprétation d'Everett tandis que Jozsa un anti-everettien, partisan d'une interprétation informationnelle : une collaboration naît néanmoins et un article est publié avec l'interprétation orthodoxe. On a vu un article pour lequel Griffiths et Niu ont collaboré (1996) : d'un côté, Griffiths est un avocat des histoires décohérentes, de l'autre son étudiant Niu utilise simplement l'interprétation orthodoxe. L'article de CHSH met également en scène des physiciens qui sont en désaccord sur l'issue de l'expérience qu'ils proposent et qui défendent des positions interprétatives diverses.

On peut ajouter d'autres exemples. Dans le domaine de la cryptographie quantique (proche par certains aspects de la computation quantique), un article de Fuchs *et al.* (1997) propose une stratégie optimale pour un agent qui souhaite écouter une conversation quantique cryptée. Il réunit plusieurs physiciens : Fuchs, Peres et Niu, qui avaient une position relativement orthodoxe[53], Gisin, qui a travaillé sur des théories à variables cachées[54] et Griffiths, dont on a déjà parlé de la position en faveur de l'interprétation des histoires décohérentes (section 3.1). L'article est publié avec l'interprétation orthodoxe. Un autre exemple réside dans les nombreuses collaborations d'Aharonov et Vaidman. Ce dernier est un défenseur de l'interprétation des mondes

[53]Peres (1993) est un manuel orthodoxe opérationnaliste, se réclamant de Copenhague. Fuchs et Peres (2001) défend une position orthodoxe. Fuchs a depuis développé une approche en terme d'information bayésienne (2002, 2010).

[54]Il défend aujourd'hui une position réaliste à propos des propensions (Gisin, 2010).

multiples, mais ce n'est pas la position d'Aharonov[55].

Précisons à présent l'interprétation qui est utilisée dans la publication de tels articles. En tant que travaux issus de collaboration entre physiciens utilisant des interprétations diverses, y en a-t-il l'une ou l'autre qui s'impose lors de la publication ? Dans la plupart des cas, c'est l'interprétation orthodoxe (voire même sa version minimale) qui est utilisée : de fait, il semble que les physiciens considèrent en effet qu'utiliser cette interprétation revient à ne pas prendre parti dans le débat interprétatif. Il s'agit en quelque sorte d'une neutralité du point de vue de la tradition de la communauté scientifique (en raccourci, je parlerai parfois du fait que cette interprétation soit *socialement* neutre, bien que j'ai montré à la section 1.7 que cette pratique n'est pas *interprétativement* neutre). C'est la façon pour les différents co-auteurs de ne pas laisser une interprétation plutôt qu'une autre figurer dans l'article. Parfois, on pourra trouver une brève remarque sur les positions de l'un ou l'autre des auteurs. Les articles en collaboration qui seraient rédigés avec une seule interprétation sont rares[56]. Par exemple dans le cas de Fuchs *et al.* (1997), Griffiths et Niu firent un autre article à part (1997), pour présenter une reformulation de l'explication de l'article commun au moyen des histoires décohérentes, avec un nouveau circuit quantique à l'appui.

3.4 L'interprétation utilisée dans la publication

Dans cette section, j'aborde la question de l'interprétation quantique qui est utilisée dans la publication des travaux. J'ai indiqué à quelques reprises que c'est très souvent l'interprétation orthodoxe, et plus particulièrement sa version minimale[57], qui est employée. Je souhaite à présent dresser ce constat plus solidement.

Tout d'abord, il faut reconnaître que la très grande majorité des physiciens adopte l'interprétation orthodoxe (minimale) et utilise la pratique scientifique qui en est issue, pour tous leurs travaux. De façon grossière, cela peut être dû à deux facteurs : ou bien ils estiment que l'interprétation orthodoxe fournit une image vraie du monde, ou bien ils restent agnostiques quant à l'interprétation de la mécanique quantique, mais utilisent l'interprétation orthodoxe par défaut, de façon pragmatique[58]. De façon naturelle, tous ces physiciens publient leurs travaux en utilisant l'interprétation orthodoxe.

[55] Cf. par exemple Vaidman (1999), ainsi qu'Aharonov et Vaidman (1996), p. 1.

[56] Dans le cas des articles de Griffiths et Niu, rédigé avec l'interprétation des histoires décohérentes alors que Niu adopte l'interprétation orthodoxe, on peut supposer que, si c'est l'interprétation de Griffiths qui figure dans l'article, c'est parce que Niu était son étudiant.

[57] J'ai présenté cette version minimale au chapitre 2, section 1.3.

[58] Je reviens sur ce pragmatisme dans le chapitre suivant, section 1.2.1.

Considérons maintenant les physiciens qui adoptent d'autres interprétations que l'interprétation orthodoxe. Nous avons vu de nombreux exemples (sections 3.1 et 3.2) qui établissent que ces physiciens, s'ils sont moins nombreux, n'en sont pas moins éminents. Dans leur grande majorité, les travaux dans le domaine du calcul quantique sont publiés avec l'interprétation orthodoxe (éventuellement dans sa version minimale), alors que d'autres interprétations ont clairement contribué à leur élaboration. Ainsi, c'est là encore l'interprétation orthodoxe qui figure dans les articles publiés. Dans les exemples que j'ai donnés, les seuls physiciens qui utilisent une autre interprétation quantique pour la publication (Deutsch et Griffiths) sont d'ardents défenseurs de cette interprétation (respectivement, l'interprétation d'Everett et celle des histoires décohérentes).

De façon générale, lorsque les articles laissent transparaître l'utilisation d'une autre interprétation, c'est souvent de façon minime. Le cas de Aharonov et Vaidman (2007) est peut-être exemplaire : il s'agit d'un article de synthèse concernant un certain formalisme quantique, dit « des deux états », qui est utile pour l'analyse de certaines expériences présentant une symétrie temporelle. En plus de l'interprétation orthodoxe, cet article utilise l'interprétation des mondes multiples, dont j'ai indiqué que Vaidman est un défenseur. Néanmoins, l'article d'une cinquantaine de pages n'aborde la question interprétative que dans un seul petit paragraphe final. Les remarques interprétatives sont ainsi dissociées du corps du travail. De nombreux physiciens sont de l'avis que cela devrait être le cas. Par exemple John Sipe, un professeur de Physique de l'Université de Toronto qui s'intéresse de près aux interprétations quantiques, estime que les remarques interprétatives doivent figurer au mieux en note ou en conclusion d'un article[59]. Bien souvent, les préférences interprétatives n'apparaissent tout simplement pas, ni non plus les éléments de la pratique issue d'une interprétation particulière qui a pu aider le physicien. C'est le cas par exemple de Deutsch et Jozsa (1992), alors que Deutsch est partisan de l'interprétation des mondes multiples. On ne trouve pas non plus dans Shor (1994) de trace de l'interprétation des mondes multiples, alors qu'il dit qu'il s'est appuyé sur elle. Ainsi, on peut dresser le constat que la très grande majorité des physiciens évitent d'utiliser publiquement une pratique différente de celle de l'interprétation orthodoxe (seuls ceux qui défendent activement une interprétation le font).

Les scientifiques avancent plusieurs raisons pour le justifier. Je vais simplement les évoquer ici, car je les aborde de manière normative au chapitre 7. Tout d'abord, la grande majorité des scientifiques ne s'intéressent tout simplement pas aux questions

[59] Communication personnelle, mai 2010.

d'interprétations, d'où le fait qu'ils se limitent à une pratique minimale ; pour certains, cela est dû à une conception instrumentaliste de la science. Parmi ceux qui s'intéressent à la question interprétative, une grande partie considère que les remarques interprétatives n'ont pas leur place dans les publications scientifiques. Une des raisons qu'ils avancent est que l'interprétation de la théorie est davantage une question philosophique que scientifique, et n'a donc pas sa place dans un article scientifique[60]. Une autre raison invoquée est qu'une interprétation ou une formulation mathématique particulière pourrait gêner ou rebuter leurs lecteurs, dans l'hypothèse où ils adoptent une autre position interprétative[61]. Ils séparent ainsi la partie technique des considérations plus interprétatives. Il semble donc que l'usage publique de la pratique issue de l'algorithme soit adoptée avec le soucis explicite de maintenir une unité dans la communauté, en évitant les possibles divisions qui pourraient venir de la pluralité d'interprétations. Je reviendrai plus longuement sur ces questions dans le chapitre 7.

Cette section 3 a présenté des travaux majeurs de mécanique quantique dans lesquels des interprétations quantiques variées ont joué des rôles, dans la production ou dans la publication de ces travaux. Ces exemples se veulent significatifs de la recherche contemporaine en mécanique quantique. S'il est vrai que les physiciens orthodoxes sont les plus nombreux, il faut reconnaître que pour ce qui est de résultats majeurs de plusieurs domaines, les physiciens qui adoptent d'autres interprétations sont très bien représentés. L'interprétation orthodoxe est utilisée presque toujours pour la publication des travaux. On peut en conclure, de façon générale, que les interprétations jouent effectivement des rôles dans la recherche et que la pluralité d'interprétation est aussi une réalité dans la pratique scientifique.

Conclusion

Ce chapitre a proposé un nouveau regard sur la pluralité des interprétations quantiques qui a été présentée dans la première partie de cette thèse. Il a examiné en quoi les interprétations quantiques sont employées dans la pratique scientifique. J'ai montré tout d'abord que lorsqu'un physicien adopte une interprétation quantique, c'est toute sa pratique scientifique (telle que définie par Kitcher) qui peut se trouver modi-

[60] Il ne semble pas qu'il soit correct d'affirmer que l'interprétation de la théorie n'est pas une question scientifique. J'ai montré dans la section 1.7 qu'il n'est pas possible de définir une pratique scientifique interprétativement neutre. Par conséquent, la simple utilisation de la théorie suppose un choix interprétatif, ce qui fait de l'interprétation une question scientifique.

[61] C'est par exemple la position de John Sipe (communication personnelle, mai 2010).

fiée. J'ai ainsi défini la notion de pratique scientifique suggérée par une interprétation quantique. J'ai montré qu'il n'existe pas de pratique scientifique qui soit interprétativement neutre. Cela signifie que la simple utilisation de la théorie suppose de faire un choix interprétatif et que ce choix peut influencer la recherche. Autrement dit, toute pratique scientifique doit être liée à une interprétation particulière, et l'étude de la pratique scientifique en mécanique quantique ne peut éviter de prendre en compte la pluralité des interprétations. J'ai ensuite distingué deux façons dont la pratique suggérée par une interprétation peut jouer un rôle dans un travail de recherche : dans sa production et dans sa publication. J'ai finalement établi que les pratiques scientifiques issues de plusieurs interprétations différentes sont employées dans de nombreux travaux significatifs : la pluralité d'interprétations quantiques est aussi une réalité dans la recherche scientifique. Ce constat va ainsi contre l'idée que la pluralité des interprétations quantiques serait une possibilité de principe, réservée aux discussions de salon. Le fait qu'il existe plusieurs interprétations pour la mécanique quantique a des conséquences dans la pratique.

Chapitre 5

L'unité de la mécanique quantique d'un point de vue pratique

Introduction

Le chapitre précédent a montré comment les interprétations quantiques peuvent modifier la pratique scientifique. Il a aussi établi que, d'une part, il n'existe pas de pratique scientifique qui soit interprétativement neutre, et d'autre part, que les pratiques scientifiques de la recherche actuelle reflètent effectivement la pluralité des interprétations quantiques. La pluralité d'interprétations quantiques est ainsi une réalité de la recherche scientifique contemporaine. Ce chapitre propose d'en examiner certaines conséquences, à travers la notion de l'unité de la théorie.

L'unité de la mécanique quantique est abordée dans ce chapitre à travers l'étude de la pratique scientifique. Je n'en reste pas à une approche « en principe » de l'unité, qui analyse les relations logiques entre des formulations différentes de la théorie. Cela a fait l'objet d'une étude dans la première partie de cette thèse : les différentes interprétations quantiques conduisent à une équivalence empirique et elles sont des interprétations d'une même théorie au sens de la conception sémantique. Ainsi, la théorie quantique, bien que diverse par ses formulations et ses interprétations, est unie par cette équivalence en principe. Dans ce chapitre, je considère à présent l'unité de la mécanique quantique[1]. en prenant en compte les pratiques scientifiques et leur

[1] J'emploie l'expression « l'unité de la mécanique quantique » pour abréger celle, plus longue mais plus exacte, de « l'unité de l'activité scientifique qui s'appuie sur la mécanique quantique », sans vouloir indiquer que je réduis l'étude à la seule théorie quantique, puisque l'approche adoptée considère la pratique scientifique qui naît de l'utilisation de cette théorie. Parfois, l'expression « l'unité de la mécanique quantique » sera remplacée par « l'unité de la recherche en mécanique quantique ».

diversité.

D'un point de vue pratique, il existe plusieurs raisons de penser que l'unité de la mécanique quantique peut être problématique, à cause de la pluralité de ses interprétations. Tout d'abord, les positions des physiciens concernant ces interprétations semblent assez marquées et exclusives. Je veux dire par là qu'un certain nombre de physiciens sont des défenseurs d'une interprétation quantique particulière[2] et ne voudraient pas employer les concepts ou les lois d'autres interprétations. Par exemple, l'immense majorité des physiciens ne sont pas prêts à employer les équations de l'interprétation bohmienne et ne les connaît peut-être même pas. Si des physiciens bohmiens les utilisaient dans leurs travaux, ceux-ci pourraient ne pas être compris par les autres physiciens et cela pourrait entraîner une division de la communauté scientifique. Ce n'est pas le cas de la mécanique classique : cette théorie dispose de plusieurs formulations et interprétations, mais tous les physiciens s'accordent à les reconnaître toutes.

Le second point, et c'est le plus important, vient du chapitre précédent, où il a été établi que la pratique scientifique dépend nécessairement de l'interprétation quantique adoptée (il n'existe pas de pratique neutre). Le fait est que chaque interprétation quantique peut intervenir dans la production et la publication d'un travail de recherche, par exemple au moyen de ses concepts ou de la formulation mathématique associée. L'interprétation quantique n'est pas simplement une position métaphysique qui serait sans lien avec la pratique de la recherche (auquel cas l'unité en pratique ne serait peut-être pas menacée). J'ai aussi indiqué qu'on peut définir des pratiques scientifiques associées à chacune des interprétations. Peut-être ces pratiques n'ont-elles rien de commun. On assisterait à un éclatement de la communauté scientifique, suivant les lignes tracées par la pluralité des interprétations. Les physiciens pourraient aussi devenir séparés les uns des autres à cause de l'interprétation quantique qu'ils adoptent, sans qu'il n'existe de communication entre les différentes écoles interprétatives. Ainsi, l'unité en pratique de la mécanique quantique ne semble pas s'imposer d'elle-même, à cause de la pluralité des interprétations que la théorie admet ; s'il existe une unité en pratique, elle doit être recherchée et légitimée.

Le but du présent chapitre est d'établir si la mécanique quantique est effectivement désunie en pratique, ou s'il est possible au contraire de dégager une notion d'unité en pratique. Cette étude n'a pas été entreprise jusque-là. Du côté des philosophes ou historiens qui adoptent l'approche en pratique, les études de cas ont très souvent concerné d'autres théories que la mécanique quantique. Par exemple, Kuhn (1962/1970) a étu-

[2] Cf. les exemples du chapitre précédent, notamment la section 3.

dié la mécanique classique, l'électro-magnétisme, la thermodynamique ou la chimie ; Kitcher (1993) s'est intéressé à la théorie darwinienne de l'évolution. Les quelques fois où la mécanique quantique a été étudiée, elle l'a été pour d'autres aspects que celui de l'unité — généralement, c'est la naissance de la théorie qui était le point focal[3]. Des historiens ont insisté sur certaines divisions intellectuelles ou sociales entre les acteurs scientifiques qui adoptaient des interprétations différentes, mais sans proposer d'analyse de ce qui constitue l'unité scientifique en général[4]. Une exception est peut-être Beller (1999), qui étudie l'histoire de la révolution quantique et insiste sur la place des dialogues dans la recherche scientifique de cette période. Mais l'analyse de Beller se concentre surtout sur la période historique de la naissance de la mécanique quantique (1925-1935) : elle ne porte pas sur la pluralité des interprétations de la période plus contemporaine (à partir des années 1950) qui m'intéresse ici. En fait, l'unité de la mécanique quantique a surtout été étudiée par les philosophes tenants de l'approche en principe. Ils se sont attachés à établir l'équivalence prédictive entre les diverses interprétations : c'est un thème classique de la philosophie de la mécanique quantique[5].

Ainsi, la question de l'unité en pratique de la mécanique quantique est nouvelle, et il n'existe pas de position préalablement défendue dont je pourrais discuter. Il existe en revanche des outils d'analyse qui ont été forgés par l'approche en pratique. Différents concepts ont été développés pour analyser la pratique scientifique, définissant au moins implicitement différents concepts d'unité en pratique. C'est donc naturellement que je vais essayer d'utiliser ces outils dans le cas de la mécanique quantique. Je discute en détail de l'analyse proposée par Kitcher. Il s'agit d'étudier la question de savoir si le concept d'unité en pratique qu'il a proposé peut s'appliquer à la situation actuelle en mécanique quantique, c'est-à-dire s'il la considère comme étant unie.

Voici quelques commentaires sur la méthodologie adoptée et sur les limites de l'étude entreprise dans ce chapitre. Ce qui peut jouer un rôle en pratique dans l'activité scientifique, de près ou de loin, peut être extrêmement vaste : il peut s'agir de facteurs aussi bien épistémiques, historiques, sociologiques, politiques, qu'économiques. Dans ce chapitre comme dans le précédent, mon analyse de la pratique scientifique ne considère que des facteurs *épistémiques*, qui sont en général publics et conscients :

[3]Cf. par exemple Kuhn (1987).

[4]Par exemple Freire (2004), (2005), (2006), (2009), Osnaghi *et al* (2009).

[5]C'est ce que j'ai fait au chapitre 2, section 4. J'avais cité Albert (1992) ; tous les ouvrages de philosophie de la mécanique quantique parlent de cette équivalence de façon plus ou moins approfondie. Pour une étude historique de l'équivalence vers 1926, voir par exemple Muller (1997a, b) et Perovic (2008).

j'étudie plus particulièrement les contenus des publications scientifiques. Je délaisse ici par exemple les compétences tacites et je n'étudie pas non plus les divisions de la communauté scientifique pour des motifs sociologiques, comme les institutions. En revanche, je m'intéresse aux raisons épistémiques pour lesquelles un contenu n'est pas accessible à une certaine partie de la communauté scientifique (formalisme différent, interprétation inconnue...). Le projet de ce chapitre est donc bien philosophique, dans la mesure où il s'agit d'étudier la question de savoir si un concept d'unité (épistémique) peut s'appliquer à la mécanique quantique. Les questions posées relativement à l'unité d'une théorie ou d'un champ disciplinaire peuvent être de deux ordres : descriptif ou normatif. Je n'ai parlé jusqu'à présent que du premier aspect descriptif, celui que ce chapitre prend à sa charge. Les deux prochains chapitres aborderont la question normative liée à cette unité. Je traite ici le cas de la mécanique quantique, mais la méthodologie et certains résultats pourraient s'appliquer à d'autres théories ou champs disciplinaires qui admettent plusieurs interprétations ou formulations mathématiques. J'indiquerai au fil du chapitre la possibilité de généralisations (notamment à la section 2).

La démarche que j'adopte dans ce chapitre est la suivante. Je commence par envisager la conception de l'unité que propose Kitcher. Elle repose sur l'existence, dans la communauté scientifique, d'un consensus à propos d'une certaine pratique scientifique. Je montre qu'en un sens strict, la pratique scientifique consensuelle est quasiment inexistante en mécanique quantique. En revanche, en un sens pragmatique et instrumentaliste, la pratique orthodoxe minimale est acceptée par tous les physiciens. Cela permet d'établir un premier sens selon lequel la mécanique quantique est unie en pratique : les scientifiques partagent, de façon pragmatique, une manière commune de faire de la recherche. Cette conception de l'unité est fondée sur la notion de consensus et elle fixe un instantané de l'état de la discipline. Je défends l'idée que la notion d'unité selon Kitcher fait face à certaines limites parce qu'elle repose sur l'idée d'un consensus. Elle ne parvient pas à saisir certaines nuances de l'idée intuitive d'unité, qui sont précisément en jeu dans le cas de la mécanique quantique. Je propose alors dans la section 2 un nouveau concept d'« unité par la fécondation », fondé sur une certaine relation de réutilisation entre les travaux scientifiques, que j'appelle « relation de fécondation ». Un domaine de recherche est uni pourvu que d'anciens travaux scientifiques puissent être réutilisés, sous certains conditions. La conception de l'unité qui s'en dégage est dynamique, dans la mesure où d'anciens travaux sont utilisés pour de nouveaux, et que cela établit une certaine continuité. Cette unité autorise l'existence d'une diversité de positions au sein des scientifiques. Elle est ainsi

complémentaire de l'unité comprise comme un consensus, par exemple celle de Kitcher. Je montre finalement (section 3) que cette notion d'unité par la fécondation s'applique à la mécanique quantique et qu'elle y saisit ce qui caractérise précisément l'unité en pratique malgré la pluralité des interprétations. Ainsi, un résultat essentiel de ce chapitre est la proposition d'une nouvelle conception de l'unité en pratique. Je montre que cet outil, forgé pour rendre compte de l'unité de la mécanique quantique, n'est pas spécifique à cette théorie ; il caractérise au contraire une idée générale d'unité et peut s'appliquer dans d'autres champs disciplinaires.

1 L'unité en pratique de la mécanique quantique selon Kitcher (1993)

Pour identifier s'il existe une unité d'un point de vue pratique en mécanique quantique, je commence par considérer dans cette section l'analyse de l'unité qu'a proposée Kitcher, puisque c'est avec son concept de « pratique scientifique » que j'ai commencé à analyser la recherche en mécanique quantique, dans le chapitre précédent. L'idée générale de Kitcher est que l'unité d'un domaine de recherche passe par l'existence d'un certain consensus entre les pratiques des différents scientifiques qui travaillent dans le domaine. Cela correspond à une conception répandue et naturelle de l'unité : des agents sont unis s'ils partagent certains engagements communs, dans la façon de pratiquer leur recherche. En quoi cette notion d'unité pourrait-elle aider à analyser la situation en mécanique quantique ? Le chapitre précédent a montré que chaque interprétation quantique suggère une certaine pratique scientifique. Comme les physiciens quantiques adoptent des interprétations quantiques variées, il existe des pratiques scientifiques variées au sein de la communauté quantique (cf. la section 3 du précédent chapitre). J'ai indiqué cependant que certains éléments de la pratique scientifique peuvent être suggérés par des interprétations quantiques différentes. Il est donc possible que des pratiques suggérées par des interprétations différentes se recoupent et qu'il existe une pratique scientifique commune en mécanique quantique. Celle-ci serait à la base de l'unité de la mécanique quantique, d'un point de vue pratique.

Le plan de cette section est le suivant : je présente l'analyse de l'unité que propose Kitcher (section 1.1), avant de l'appliquer au cas de la mécanique quantique (section 1.2) ; je fais enfin quelques remarques sur la notion d'unité qui ressort de la position de Kitcher (section 1.3). Cette section consiste à appliquer l'analyse de l'unité de Kitcher au cas de la mécanique quantique. Il faut noter que cela n'a pas

été fait jusqu'à présent. Kitcher prend des exemples dans la physique et la biologie, mais n'aborde pas la mécanique quantique. L'analyse que je propose dans les pages suivantes est la mienne. Je défends l'idée selon laquelle il n'existe pas, à strictement parler, de pratique scientifique consensuelle en mécanique quantique ; en revanche, dans un sens pragmatique et instrumentaliste, la pratique scientifique issue de l'interprétation orthodoxe minimale est consensuelle.

1.1 La « pratique consensuelle » selon Kitcher

Cette section présente la position de Kitcher et explicite sa conception de l'unité de la recherche scientifique[6]. Au chapitre précédent (p. 129), j'ai présenté le concept de « pratique scientifique individuelle » de Kitcher (1993, p. 74). Elle repose sur un certain nombre d'engagements de la part du scientifique. Pour rappel, la pratique scientifique d'un individu comprend le langage qu'il utilise, les questions qu'il considère comme significatives, les énoncés qu'il accepte, les motifs d'explication, les informateurs crédibles, les exemples-types d'expérimentation et d'observation, et la méthodologie du raisonnement. À partir de cette pratique scientifique individuelle, Kitcher construit une autre unité d'analyse : la « pratique consensuelle » (« consensus practice »). Pour cela, il faut considérer une certaine communauté scientifique, c'est-à-dire un ensemble de scientifiques qui sont considérés comme faisant autorité sur un certain domaine de recherche (par exemple, le domaine de recherche des phénomènes quantiques). Une pratique consensuelle est associée à une communauté scientifique et se définit à partir des pratiques individuelles. Elle comprend : le *cœur du consensus*, constitué de ce que les pratiques individuelles ont en commun ; le *consensus virtuel*, constitué par les pratiques communes des spécialistes d'un sous-domaine, tels que définis par les reconnaissances d'autorités[7].

Ainsi définie, la pratique consensuelle est acceptée par tous les membres d'une communauté scientifique. Kitcher envisage ensuite une évolution temporelle, dans laquelle les pratiques individuelles évoluent et de nouveaux membres de la communauté sont formés[8]. La pratique consensuelle peut alors évoluer elle aussi. Kitcher réaffirme que l'appartenance à la communauté est équivalente à l'acceptation de la (nouvelle)

[6] Je m'appuie ici sur Kitcher (1993), chapitre 3, notamment p. 58-61, 74-75, 87-89.

[7] Le consensus virtuel a pour but d'éviter, par exemple, que l'on considère que deux scientifiques ne partagent presqu'aucun éconcé sous prétexte qu'ils sont des spécialistes de deux sous-domaines de recherches disjoints. S'ils se reconnaissent comme étant mutuellement crédibles, alors les énoncés acceptés par l'un le seront pas l'autre et il existera une pratique consensuelle entre eux.

[8] Je ne détaille pas ce processus ici, qui n'est pas important pour la notion d'unité que je souhaite discuter chez Kitcher.

pratique consensuelle — et c'est là le point essentiel que je retiens pour la suite. Notamment, si la pratique consensuelle évolue, ceux qui n'acceptent pas ce changement sont de fait exclus de la communauté. Bien entendu, les scientifiques peuvent avoir à titre individuel une pratique plus étendue que la pratique consensuelle.

Explicitons à présent le concept d'unité proposé par Kitcher. Une communauté scientifique est unie dans la mesure où l'on peut identifier une pratique consensuelle qui soit acceptée par chaque membre de la communauté. Des scientifiques ne sont unis que dans la mesure où leur pratique scientifique individuelle se rejoint sur certains points consensuels. Trois remarques méritent d'être faites sur ce concept d'unité. La première porte sur le rapport entre l'unité d'une communauté et la diversité des pratiques individuelles. Comme l'unité repose sur le consensus, le fait qu'une communauté scientifique soit unie n'est certainement pas dû à l'existence d'une diversité des pratiques individuelles. Lorsqu'il existe une certaine diversité dans les pratiques scientifiques individuelles, la communauté est unie seulement *malgré* la diversité en question. L'unité de la diversité se fait de façon seulement négative, précisément parce que cette diversité n'est pas trop grande. Une deuxième remarque est que l'unité consensuelle de Kitcher établit une propriété des pratiques scientifiques *à un instant donné*. Cela repose sur l'existence d'un corpus fixé (la pratique consensuelle) qui soit le reflet de la discipline à ce moment. La notion d'unité est statique, dans la mesure où elle caractérise un instantané de l'état de la discipline. Une troisième remarque est que l'unité de Kitcher vient par degrés, c'est-à-dire que sa conception permet de considérer qu'une communauté scientifique est plus ou moins unie. En effet, selon que les scientifiques ont des pratiques scientifiques proches ou dissemblables, la pratique consensuelle sera étendue ou restreinte, ce qui permet de considérer que l'unité est plus ou moins grande. Comme, dans de nombreux domaines de recherche, il est vraisemblable qu'on puisse identifier une pratique consensuelle qui ne soit pas vide, étudier la question de savoir si un domaine de recherche est uni consiste surtout à apprécier l'étendue du consensus.

1.2 Quelle est la pratique scientifique consensuelle en mécanique quantique ?

La conception de l'unité selon Kitcher, qui a été présentée dans la section précédente, peut être maintenant appliquée au cas de la mécanique quantique. L'objectif est de savoir si la mécanique quantique est unie au sens de Kitcher, en dépit de la pluralité des interprétations et, peut-être, de la pluralité des pratiques scienti-

fiques individuelles. Il s'agit d'identifier la pratique scientifique consensuelle parmi les scientifiques qui emploient la mécanique quantique. Si cette pratique consensuelle est substantielle, alors la mécanique quantique peut être considérée comme étant unie d'un point de vue pratique (je rappelle que l'unité chez Kitcher peut venir par degrés). Cette analyse n'a pas été réalisée jusqu'à présent ; c'est donc la mienne que je propose.

D'une certaine façon, la question a déjà été abordée dans cette thèse. Dans la section 1.7 du chapitre précédent, j'ai montré qu'il n'existe pas de pratique scientifique individuelle qui soit interprétativement neutre, c'est-à-dire qui ne prenne parti vis-à-vis d'aucune interprétation quantique. Tout au mieux, ai-je indiqué, l'expérimentation et l'observation, ainsi que certaines questions significatives, peuvent être considérées comme neutres. La définition d'une pratique scientifique neutre que j'ai donnée comprend le cas d'une pratique scientifique qui serait commune aux pratiques suggérées par les différentes interprétations. Elle inclue donc précisément la pratique consensuelle de Kitcher. Aussi, cette dernière ne comprend, au mieux, que ce qui a trait à l'expérimentation et à l'observation, ainsi que certaines questions significatives. La pratique consensuelle en mécanique quantique est donc extrêmement réduite. L'analyse de Kitcher conduit à considérer que la communauté physicienne de la mécanique quantique est très peu unie en pratique.

Faut-il en rester là ? La lecture de Kitcher que j'ai eue implicitement jusque là peut être qualifiée de « stricte », au sens où j'ai considéré que, pour qu'une composante appartienne à la pratique d'un scientifique, celui-ci doit l'accepter pleinement. Par exemple, on peut considérer qu'un scientifique accepte un énoncé s'il croît que cet énoncé est vrai, au regard de l'interprétation quantique qu'il adopte par ailleurs. Je vais proposer une autre façon dont on peut considérer qu'une composante de la pratique est acceptée par un scientifique — et donc, plus largement, une autre façon de comprendre l'analyse de Kitcher.

1.2.1 L'acceptation en un sens pragmatique et instrumentaliste

Pour sauver une conception substantielle de la pratique consensuelle chez Kitcher, je propose d'assouplir la façon dont on peut concevoir l'adoption d'une pratique scientifique par un individu. Je considère à présent que l'acceptation peut se faire d'un point de vue instrumentaliste ou pragmatique. Pour préciser ce que cela signifie, reprenons le cas de l'acceptation d'un énoncé. On peut reconnaître qu'un énoncé n'est pas vrai du monde selon l'interprétation quantique qu'on adopte, mais néanmoins

être intéressé par l'usage qui peut en être fait ou par l'utilité qu'il peut procurer. Considérons par exemple la mesure du spin d'un électron dans l'état $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$. Soit l'énoncé « la mesure a eu pour résultat $|\downarrow\rangle$ ». En un sens strict, un physicien everettien n'accepte pas cet énoncé puisqu'il considère que les deux résultats de l'expérience se sont réalisés, et qu'il n'y a pas eu un seul résultat réalisé. Cependant, il peut accepter l'énoncer en lui attribuant une validité limitée : l'énoncé est acceptable dans une certaine branche de l'univers (celle où lui-même se trouve). Ce faisant, le physicien y trouve une utilité : d'une part, l'énoncé est plus simple à manipuler s'il restreint la suite de son étude à cette branche de l'univers ; d'autre part, il se fait comprendre facilement par les physiciens qui adoptent d'autres interprétations (et qui, eux, acceptent l'énoncé sans réserve). Ainsi, un physicien peut accepter un énoncé qui n'est pas en stricte adéquation avec le sens qu'il a selon l'interprétation quantique qu'il adopte par ailleurs. Comme l'indique van Fraassen à propos de l'acceptation d'une théorie, « *ce qui est en jeu est davantage que la croyance* »[9] : un énoncé peut être accepté pour l'usage et l'utilité qu'il permettra. C'est ce qui intéresse les physiciens, lorsqu'ils acceptent de façon instrumentaliste ou pragmatique certaines énoncés. L'acceptation d'un énoncé est « instrumentaliste » dans la mesure où le physicien ne croît pas nécessairement que les entités ou les faits auxquels l'énoncé se réfère existent (elles peuvent être en décalage avec l'image du monde auquel il croît). Pour reprendre l'exemple ci-dessus, un everettien peut parler du résultat de mesure du spin tout en sachant que, selon son interprétation, il n'existe pas de tel fait dans le monde. L'attitude instrumentaliste ou pragmatique envers les énoncés rejoint ce que j'ai appelé un « usage *souple* ou *flou* » du langage (chapitre 2, p. 87). J'en ai parlé à propos des physiciens qui utilisent des termes dans le sens du langage courant, et non pas dans le sens qu'ils ont dans l'interprétation qu'ils adoptent. L'acceptation instrumentaliste ou pragmatique est une généralisation de cet usage, envers toutes les interprétations quantiques.

Toutes les composantes de la pratique scientifique peuvent être acceptées de cette façon instrumentaliste et pragmatique. Un physicien peut employer un langage différent de celui de l'interprétation quantique avec laquelle il travaille, dans le but de se faire comprendre par les autres physiciens. Il peut aussi considérer une question comme significative bien qu'elle soit formulée dans le langage d'une interprétation particulière. Par exemple, nous avons vu dans la section 1.2 du chapitre précédent que la question « quelles sont les trajectoires de Bohm de photons ? » n'est pas significative à première vue pour les interprétations orthodoxe et everettienne, parce

[9] Van Fraassen (1980), p. 88.

qu'elles ne considèrent pas que les trajectoires de Bohm existent. Cependant, elles peuvent considérer ces trajectoires de façon instrumentaliste, dans la mesure où leur détermination prend un sens expérimental clair (et acquiert une pertinence) avec le procédé de la mesure faible.

De façon générale, c'est l'attitude envers l'ensemble de la mécanique quantique qui peut être instrumentaliste ou pragmatique. C'est ainsi que Bell peut dire :

> « la mécanique quantique ordinaire (autant que je sache) fonctionne parfaitement bien à toutes fins pratiques »[10]

Bell signifie que la mécanique quantique ordinaire, c'est-à-dire dans sa formulation orthodoxe (éventuellement minimale) est effectivement couronnée de succès expérimentalement. Dans cet article intitulé « Contre la Mesure », Bell aborde l'approximation conceptuelle qui règne en mécanique quantique, à travers des termes tels que « mesure », « appareil » ou « macroscopique » et argumente en faveur de leur abandon. Il concède dans un premier temps que le manque de clarté conceptuelle de la formulation habituelle de la mécanique quantique n'empêche pas les physiciens de l'employer avec dextérité, de sorte qu'elle ait un excellent accord avec l'expérience.

Il ne faudrait pas se méprendre sur l'attitude pragmatique ou instrumentaliste que je propose de considérer ici. Je ne la considère pas simplement comme une façon de considérer une théorie scientifique quelconque, de manière générale. Je ne cherche pas à argumenter ici sur le bien-fondé de l'instrumentalisme ou de l'anti-réalisme, contre le réalisme. Je note simplement qu'il est possible d'avoir une attitude pragmatique ou instrumentaliste envers une pratique scientifique issue d'une certaine interprétation. La question de l'attitude du scientifique porte sur le rapport qu'il établit entre des pratiques issues d'interprétations différentes de la mécanique quantique. Il peut être réaliste envers une interprétation particulière de la théorie, et néanmoins utiliser de façon pragmatique une autre interprétation. Certains écarts sont ainsi permis. Par conséquent, la pratique scientifique qu'un physicien peut adopter est accrue. Je reviens plus loin (p. 178) sur la notion d'engagement du scientifique et de degrés d'engagements.

[10]Bell (1990), p. 33. En majuscules dans le texte original, car il souhaite insister : « ORDINARY QUANTUM MECHANICS (as far as I know) IS JUST FINE FOR ALL PRACTICAL PURPOSES ».

1.2.2 Le consensus à propos de la pratique suggérée par l'interprétation orthodoxe minimale

La section précédente a proposé de considérer qu'un scientifique peut employer, de manière instrumentaliste ou pragmatique, une pratique scientifique différente de celle suggérée par l'interprétation qu'il adopte. Cette section 1.2.2 veut établir qu'il existe une pratique consensuelle dans le domaine de la mécanique, en ce sens pragmatique ou instrumentaliste. Je vais montrer que la pratique issue de l'interprétation orthodoxe minimale est dans cette situation[11].

Pour cela, je vais m'appuyer sur la section 3.4 du chapitre précédent, qui a établi le constat selon lequel les scientifiques publient presque toujours leurs articles en se servant de l'interprétation orthodoxe minimale (c'est-à-dire, en adoptant la pratique issue de cette interprétation). En particulier, j'ai montré que c'est le cas pour les scientifiques qui ont travaillé et produit un résultat grâce à une autre interprétation que l'interprétation orthodoxe : ils acceptent de publier avec l'interprétation orthodoxe minimale. Il me semble que ce simple fait suffit à prouver qu'ils acceptent la pratique orthodoxe minimale de façon instrumentaliste ou pragmatique. Rédiger un article selon une interprétation à laquelle on ne croît pas n'est possible que si on l'accepte au moins de façon instrumentaliste. Si ce n'était pas le cas, ces scientifiques publieraient leurs articles avec l'interprétation avec laquelle ils ont travaillé et à laquelle ils croient.

Mieux, certains scientifiques acceptent aussi d'utiliser la pratique orthodoxe minimale pour mener leurs recherches, donc pour produire certains travaux, alors même qu'ils croient en une autre interprétation. Je vais développer l'exemple des physiciens bohmiens. Un des physiciens à adopter expressément une telle attitude pragmatique envers l'interprétation orthodoxe est Jean Bricmont. Ce physicien belge est un défenseur connu de l'interprétation de Bohm, comme étant la meilleure façon de comprendre la théorie quantique et ses propriétés[12]. À côté de cela, il considère aussi que l'interprétation orthodoxe, dans sa version minimale, est parfaitement légitime et doit être employée, dès lors qu'il est question d'une utilisation en pratique de la théorie par le physicien dans son travail de recherche[13]. Par exemple, le postulat de réduction de la fonction d'onde est accepté, « à toutes fins pratiques », bien qu'il n'existe pas en tant que postulat dans la formulation bohmienne de la mécanique quantique. Cette acceptation instrumentaliste et pragmatique peut d'ailleurs recevoir

[11] J'ai présenté cette version minimale au chapitre 2, section 1.3.

[12] Cf. Bricmont (1999), (2002), (2009).

[13] Communication personnelle de Jean Bricmont, mai 2011. Sa position semble représentative des physiciens partisans de l'interprétation de Bohm, dans leur ensemble.

une certaine justification théorique : la réduction de la fonction d'onde se justifie en mécanique bohmienne comme étant une réduction *effective*, dès lors que certaines parties de la fonction d'onde n'interagiront plus ensemble ensuite[14]. Rappelons que la formulation mathématique suggérée par l'interprétation de Bohm est fort différente de celle utilisée habituellement avec la mécanique quantique orthodoxe : elle contient des variables supplémentaires pour les positions des particules et le potentiel bohmien, ainsi qu'une équation fondamentale en plus de l'équation de Schrödinger[15]. Le traitement d'un problème par la formulation bohmienne est ainsi très différent de celui qui a lieu en mécanique quantique habituelle avec l'algorithme quantique. Aussi, l'attitude pragmatique qu'adopte Bricmont n'est pas anodine, dans la mesure où il est prêt à accepter d'utiliser des mathématiques, des concepts ou des lois qui ne sont pas celles que son interprétation suggère naturellement. Il existe une raison pragmatique pour laquelle la formulation orthodoxe est employée par les physiciens partisans de l'interprétation de Bohm : pour la résolution de la plupart des problèmes, le formalisme mathématique de la mécanique bohmienne est substantiellement plus compliqué à utiliser que le formalisme standard, à cause du calcul des trajectoires bohmiennes. C'est un point que les bohmiens reconnaissent volontiers[16].

Les physiciens, s'ils ne défendent pas à une interprétation particulière, considèrent au moins la réduction de la fonction d'onde, comme « un raccourci pour tout un appareil mathématique »[17]. D'ailleurs, lorsque Wallace (2008) présente la formulation orthodoxe minimale de la mécanique quantique, il en parle comme d'une « méthode pragmatique »[18] d'obtenir des prédictions, c'est-à-dire une manière d'extraire du contenu empirique à partir de la théorie formalisée.

Le constat que je fais d'une utilisation instrumentaliste de la formulation orthodoxe de la théorie à l'heure actuelle n'est pas nouveau. Déjà, l'historienne Beller faisait un constat similaire à propos des premières heures de la mécanique quantique :

> « C'était sur l'*efficacité* des *outils* mathématiques [...] qu'il y avait un accord dans la communauté des physiciens quantiques. Et sur ce point les orthodoxes

[14]Cf. par exemple Goldstein (2009), section 8, et Dürr et Teufel (2009, p. 179-183). Ce qui importe ici est que la réduction de la fonction d'onde soit considérée comme une règle pour elle-même, à toutes fins pratiques. On peut d'ailleurs noter que l'expression « for all practical purposes » est récurrente — une trentaine de fois — dans le manuel bohmien de Dürr et Teufel.

[15]Cf. chapitre 2, section 2.

[16]Cf. par exemple Bricmont (communication personnelle, mai 2011).

[17]C'est la position de Aephraim Steinberg, professeur de Physique à l'Université de Toronto (communication personnelle, mai 2010). J'ai déjà évoqué ses travaux, dans lesquels il emploie la mécanique bohmienne (Kocsis *et al*, 2011), au chapitre 4, section 1.2.

[18]Wallace (2008), p. 20.

et l'opposition étaient unis. »[19]

Les « orthodoxes » étaient notamment Bohr et Heisenberg, défendant l'interprétation dite de Copenhague. Schrödinger, de Broglie ou Einstein faisaient partie de l'« opposition » et défendaient d'autres interprétations. Selon Beller, le consensus existe sur les qualités des outils mathématiques : c'est-à-dire qu'il est d'ordre pragmatique et instrumentaliste.

Le constat que je propose est finalement le suivant. La pratique issue de l'interprétation orthodoxe minimale est acceptée au moins de manière instrumentaliste ou pragmatique par tous les physiciens. Ceux qui adoptent par ailleurs à une interprétation différente de l'interprétation orthodoxe (et y croient par exemple de manière réaliste) ont une double attitude : d'une part, ils adoptent parfois la pratique de leur interprétation lors de la production de leur travaux, et d'autre part ils adoptent de façon instrumentaliste la pratique issue de l'interprétation orthodoxe minimale, pour ce qui concerne la publication de ces travaux et aussi parfois pour leur production.

1.3 Remarques sur l'unité en mécanique quantique selon Kitcher

À présent qu'une pratique consensuelle a été identifiée en mécanique quantique, je souhaite faire quelques remarques sur le concept d'unité en mécanique quantique que l'analyse de Kitcher m'a conduite à identifier. Je reviens tout d'abord sur le fait que la pratique consensuelle ne soit acceptée que d'un point de vue instrumentaliste et pragmatique (section 1.3.1), avant d'analyser davantage la notion d'« engagement » que Kitcher requiert de la part des scientifiques (section 1.3.2).

1.3.1 Une unité instrumentaliste et pragmatique

Selon Kitcher, l'unité d'un champ disciplinaire consiste en un consensus à propos d'une pratique commune, qui est adoptée par l'ensemble des scientifiques de la communauté. La notion d'unité qui prévaut est le consensus : un domaine est uni dans la mesure où les scientifiques ont des pratiques (en partie) identiques.

Pour ce qui concerne la mécanique quantique, j'ai montré que pour sauver une pratique scientifique consensuelle qui ne soit pas trop réduite, il est nécessaire de considérer que l'adoption des scientifiques envers cette pratique se fait d'un point de vue seulement instrumentaliste ou pragmatique, et non pas dans un sens réaliste

[19] Beller (1999), p. 4. Je souligne.

plus fort. S'il n'y avait pas une pluralité d'interprétations, mais une seule interprétation, il est vraisemblable que l'accord consensuel aurait pu être plus important, sans avoir besoin d'être seulement pragmatique. Par exemple, les physiciens qui adoptent l'interprétation orthodoxe partagent tous la pratique scientifique suggérée de cette interprétation. Aussi, c'est la pluralité des interprétations de la théorie qui est responsable du fait que la seule notion d'unité consensuelle qui existe dans le domaine de la mécanique quantique est une notion pragmatique et instrumentaliste. Ce faisant, l'unité dans une théorie qui admet une pluralité d'interprétations repose sur des accommodements pragmatiques et non pas sur un véritable accord de fond.

Selon Beller, cette unité seulement pragmatique et instrumentaliste existait déjà dans les débuts de la mécanique quantique. Après avoir indiqué que les outils mathématiques étaient consensuels[20], elle poursuit :

> « l'accord sur la puissance de ces outils empêchait la pratique scientifique de se désintégrer, quels que pussent être les désaccords philosophiques. »[21]

Beller affirme ici que c'est l'accord pragmatique des différents protagonistes qui permet à la pratique scientifique d'être unie — c'est-à-dire consensuelle, en l'occurrence. L'unité du domaine quantique se maintient en dépit de la diversité des positions philosophiques, c'est-à-dire de la pluralité des interprétations quantiques.

1.3.2 La notion d'« engagement »

Le fait que l'accord entre les scientifiques soit seulement instrumentaliste ou pragmatique conduit à réviser ou au moins à préciser certaines positions de Kitcher. Je vais discuter ici de sa notion d'« engagement » (« commitment »). Selon Kitcher, la pratique scientifique est constituée d'engagements scientifiques de diverses sortes. Il ne précise pas davantage ce qu'il faut entendre par « engagement » ; pour les énoncés, il en parle aussi comme d'un assentiment ou d'une acceptation ; pour le langage ou les instruments, il s'agit simplement d'un usage[22]. En quoi consiste véritablement le fait de s'« engager » ? Mon analyse de la mécanique quantique oblige à apporter quelques limites : les engagements ne peuvent pas consister en une position trop forte et définitive, qui serait valable en toutes circonstances, pour les prédictions expérimentales comme pour l'image du monde. Au contraire, on doit reconnaître que certains engagements peuvent être (parfois) seulement pragmatiques et qu'ils peuvent s'opposer dans leur contenu à d'autres engagements, qui eux seront bien plus réalistes.

[20] Cf. la citation que j'ai donnée d'elle à la p. 177.
[21] Beller (1999), p. 4.
[22] Cf. Kitcher (1993), p. 60, 74-81.

Par conséquent, je suggère de considérer que les engagements dont parle Kitcher peuvent venir par degré[23] : l'instrumentalisme serait un faible degré d'engagement, le réalisme en serait un degré plus fort. Au plus haut degré, un scientifique adhère à des énoncés uniquement s'il estime qu'ils sont vrais du monde et il n'utilise qu'eux, toujours et partout : il est un inconditionnel d'une interprétation et il rédige par exemple ses articles dans son langage et la formulation mathématique associée. Cela semble être le cas de Deutsch, qui travaille et publie avec l'interprétation d'Everett et en est un défenseur (cf. chapitre précédent, section 3). À l'inverse, un engagement très faible consiste pour un scientifique à accepter un énoncé seulement pour sa valeur heuristique ou prédictive, à considérer que l'énoncé n'est pas un candidat crédible pour décrire le monde et à ne pas s'en servir pour poursuivre sa recherche. Un engagement intermédiaire peut être de considérer un énoncé comme une façon de parler fort utile pour certains buts, mais sans se prononcer sur ce qu'il dit des entités qui composent le monde. C'est, semble-t-il, la position de la majorité des scientifiques envers la version minimale de l'interprétation orthodoxe. Si on suppose que le concept de l'engagement chez Kitcher englobe tous ces degrés, ma position revient à dire que l'engagement qui constitue l'unité en mécanique quantique est un engagement seulement pragmatique ou instrumentaliste, à la différence de ce qui peut avoir lieu dans d'autres théories, comme en optique ondulatoire dont on a parlé. L'importance de cette remarque est particulièrement valable dans un domaine comme le calcul quantique, dans lequel travaillent des scientifiques de toutes obédiences interprétatives. Si les engagements viennent par degré, cela suggère qu'on peut distinguer plusieurs niveaux dans la pratique consensuelle : un niveau de pratique pour lequel l'accord est instrumentaliste et un autre qui fera l'objet d'un consensus plus fort et réaliste. Le premier est beaucoup plus étendu en mécanique quantique que le second.

L'analyse que j'ai menée à la section 3 du chapitre précédent est compatible avec ces distinctions de degrés dans les engagements scientifiques. J'ai distingué deux rôles que peut avoir la pratique issue d'une interprétation : celui qu'elle a dans la production d'un travail et celui qu'elle a dans sa publication. Il semble que la production d'un travail est susceptible de mettre en jeu davantage d'engagements (réalistes) que ceux (instrumentalistes) qui pourront apparaître dans sa publication. On a vu par exemple que l'article de Deutsch et Jozsa (1992) est publié avec une interprétation minimale, alors que Deutsch a des engagements très forts envers l'interprétation des mondes multiples. Alors que la pratique scientifique utilisée dans la production des travaux est

[23] Pour davantage d'analyses de la notion d'engagement, on peut consulter par exemple Levi (1980), (1997) ou van Fraassen (2002).

diverse du point de vue des engagements réalistes plus forts, un accord pragmatique permet qu'il existe une pratique de publication consensuelle[24].

Conclusion concernant l'analyse de Kitcher

Dans cette section 1, j'ai cherché à utiliser l'analyse de Kitcher pour identifier une unité en mécanique quantique. Après avoir présenté son concept de pratique scientifique consensuelle, j'ai montré que le consensus en mécanique quantique est très réduit, si on s'en tient à une lecture stricte de ce qu'est s'engager envers une pratique scientifique. En revanche, dès lors qu'on nuance la position de Kitcher et qu'on considère une adoption instrumentaliste et pragmatique, la pratique scientifique issue de l'interprétation orthodoxe minimale peut être considérée comme consensuelle. Les scientifiques adoptant par ailleurs une autre interprétation se résolvent à utiliser l'interprétation orthodoxe de façon pragmatique. Cela montre que, dans l'analyse des théories scientifiques, il est nécessaire de distinguer entre la formulation précise et rigoureuse de la théorie selon une interprétation particulière (celle qu'un scientifique peut défendre) et la forme qu'elle prend dans son utilisation en recherche, qui peut être à l'opposé. Cela justifie le fait que, après la première partie de cette thèse qui a présenté et reconstruit les diverses interprétations quantiques, cette deuxième partie étudie la mécanique quantique telle que les scientifiques l'utilisent. Nous voyons en effet des différences suggérées par le pragmatisme et l'instrumentalisme.

L'analyse de Kitcher définit une unité fondée sur le consensus : les physiciens quantiques sont unis dans la mesure où ils partagent cette pratique orthodoxe. On retient ainsi une notion importante d'unité, qui permettra d'expliquer d'autres caractéristiques du domaine quantique, dans les sections suivantes de ce chapitre. Cette unité a cependant un défaut majeur : l'unité entre les diverses interprétations n'est définie que par la négative. Si les interprétations sont unies, c'est seulement dans la mesure où il existe un accord pragmatique sur une pratique avec des présupposés interprétatifs particuliers, qui exclut précisément les interprétations dans leur diversité. C'est notamment cette limitation qui me conduit à explorer, dans la section suivante, une autre conception de l'unité.

[24]Pour autant, la distinction entre acceptation réaliste et instrumentaliste ne recouvre pas celle entre production et publication : ce que les scientifiques acceptent de manière pragmatique leur sert très souvent dans la production de nouveaux travaux ; en revanche, les engagements réalistes se trouvent rarement dans les publications.

2 Proposition d'une unité fondée sur une relation de fécondation entre les travaux

La section précédente 1 a appliqué l'analyse de la pratique scientifique proposée par Kitcher au cas de la mécanique quantique. J'ai indiqué que l'unité que l'on est conduit à identifier repose sur l'existence d'un consensus dans la pratique scientifique. Pour la mécanique quantique, ce consensus est essentiellement d'ordre instrumentaliste et pragmatique. Le but de chapitre, à savoir étudier s'il existe une unité en mécanique quantique d'un point de vue pratique, ne s'arrête pas avec l'identification d'une certaine unité, en l'occurence celle de Kitcher. Celle-ci souffre de deux défauts. Le premier, je l'ai indiqué, réside dans le fait que l'unité entre les diverses interprétations est définie par Kitcher seulement par la négative — elle existe seulement dans la mesure où les physiciens renoncent aux pratiques spécifiques suggérées par les diverses interprétations. Le second défaut est relatif à l'étendue de cette unité. J'ai indiqué que la conception de l'unité de Kitcher admet des degrés, dans la mesure où la pratique consensuelle peut être plus ou moins vaste. Parvenir à identifier une certaine unité en mécanique quantique n'est donc pas forcément une surprise, puisque l'unité peut être assez faible. Ce qui est intéressant, c'est plutôt de savoir si la notion d'unité est étendue. En l'occurence, on peut considérer que l'unité en mécanique quantique est moyenne, car elle est seulement d'ordre pragmatique et instrumentaliste.

Ces deux raisons suggèrent de chercher s'il existe d'autres concepts d'unité qui s'appliquent à la mécanique quantique, afin d'identifier, peut-être, une unité plus grande. Dans cette section 2, je propose un nouveau concept d'unité. Il se fonde sur l'existence d'une certaine relation entre les travaux scientifiques, que j'appelle une relation de fécondation. L'idée générale est de considérer qu'un domaine de recherche est uni si les scientifiques sont en mesure de réutiliser mutuellement leurs travaux, sous certaines conditions. Il s'agit d'une conception de l'unité définie à partir de relations, plutôt que sur ce qui est commun à tous les scientifiques. Cette section se donne simplement pour but de présenter ce concept d'unité ; la section 3 établira que la mécanique quantique est effectivement unie en ce sens. Il convient de préciser que ce nouveau concept d'unité ne se positionne pas *contre* celui de Kitcher, mais qu'il lui est au contraire complémentaire.

Le plan de cette section 2 est le suivant. La section 2.1 commence par donner une raison supplémentaire de rechercher un autre concept d'unité que celui de Kitcher, en montrant une limite inhérente à toute conception de l'unité qui se fonde sur le consensus. Comme le concept d'unité que je propose repose sur une relation entre des

travaux scientifiques, je commence par présenter cette relation dans la section 2.2, avant de définir le concept d'unité proprement dit dans la section 2.3. Je fais ensuite quelques commentaires sur ce nouveau concept d'unité dans la section 2.4.

2.1 Les limites d'une conception de l'unité fondée sur un consensus

Le concept d'unité de Kitcher repose sur l'existence d'un consensus dans la communauté, sur certains éléments de la pratique. Cette idée de consensus a été avancée par de nombreux auteurs, qu'ils étudient la science selon une approche philosophique, historique ou sociologique[25]. Le but de cette section 2.1 est de montrer qu'une analyse qui s'appuie sur l'idée de consensus (comme celle de Kitcher) ne peut suffire à rendre compte de l'unité d'un point de vue pratique. En l'occurence, elle ne parvient pas à saisir une partie de la conception intuitive de l'unité[26]. Mon argument consiste à considérer deux situations de recherche fictives, dont l'une est manifestement plus unie que l'autre, selon une conception intuitive de l'unité. Je montre ensuite que l'analyse de Kitcher considère que les deux sont tout aussi unies l'une que l'autre, puisqu'elles présentent la même pratique scientifique consensuelle.

Les deux situations fictives que je considère sont semblables en de nombreux points. Je commence par présenter les caractéristiques qui sont communes à toutes les deux. Dans chaque situation, il existe une théorie appelée « mécanique quantique », dont plusieurs interprétations ont été proposées et qui continuent d'être appréciées et employées par les physiciens. Ceux-ci peuvent être partisans de l'une ou de l'autre, ou être agnostiques. Ils se retrouvent tous sur une certaine pratique scientifique minimale, issue d'une interprétation appelée « orthodoxe », qu'ils reconnaissent au moins de manière instrumentaliste et pragmatique, sans forcément souscrire à ses engagements envers les entités qui composent le monde. Les scientifiques peuvent publier en adoptant l'interprétation orthodoxe consensuelle, ou aussi avec leur interprétation non-orthodoxe. On remarque que, jusqu'ici, cette description est compatible avec ce que nous avons vu de l'état de la recherche en mécanique quantique.

Les caractéristiques propres à la première situation fictive sont les suivantes. Les physiciens sont regroupés dans des laboratoires en fonction de l'interprétation qu'ils adoptent (pour simplifier, il existe par exemple un laboratoire pour chaque interpré-

[25]Cf. par exemple Beller (1999), p. 310 pour une bibliographie, ainsi que son chapitre 15 pour une discussion.

[26]Il est vrai que ce fait, s'il devait être établi, n'est pas en soi un argument contre la pertinence de l'analyse de Kitcher. Cependant, il apparaîtra dans la section 3 que c'est précisément ce trait, manqué par Kitcher, qui s'applique dans le cas de la mécanique quantique.

tation). En pratique, les différences sont nettement marquées entre des physiciens qui adoptent des interprétations différentes. La pratique consensuelle joue un rôle seulement lors de la publication ; pour produire de nouveaux travaux, ils adoptent toujours la pratique de leur interprétation. De plus, ils sont strictement incapables de comprendre des énoncés d'une autre interprétation, ou les formulations mathématiques qui y sont attachées, parce qu'ils n'ont jamais fait aucun effort pour cela et que les autres interprétations leur répugnent. La conséquence de cela est qu'un physicien ne travaille jamais avec un collègue d'un autre laboratoire qui adopte une interprétation différente. Comme chacun utilise une interprétation différente dans leur travail, ils ne parviennent pas à se comprendre (leur pratique individuelle met en jeu de manière cruciale pour eux des éléments propres à leur interprétation). Éventuellement, les physiciens sont opposés par principe à tout partenariat avec des collègues qui n'ont pas les mêmes positions interprétatives qu'eux. La conséquence est qu'il n'y a jamais de publication commune entre des laboratoires différents. De plus, les physiciens ne réutilisent de fait jamais les articles publiés par un physicien d'un autre laboratoire : d'une part, ils ne parviennent pas à comprendre les articles qui sont rédigés avec une interprétation particulière. D'autre part, les laboratoires qui sont rattachés à des interprétations différentes se sont chacun orientés vers des sous-domaines et des problèmes différents, de sorte que les résultats d'autres laboratoires n'ont pas l'occasion d'être réutilisés. Ils se reconnaissent cependant mutuellemement compétents sur leurs sous-domaines de recherche respectifs. Pour résumer, ces laboratoires fonctionnent de manière séparée ; ce sont des écoles distinctes qui ne tirent pas parti de leur pratique consensuelle[27].

Dans la seconde situation fictive, règne au contraire l'harmonie la plus totale : les laboratoires sont tous mixtes vis-à-vis de l'interprétation des physiciens ; des physiciens avec des interprétations différentes participent régulièrement à des travaux communs et parviennent à travailler ensemble ; si un article est publié avec une interprétation particulière, n'importe quel autre physicien peut le comprendre ; il n'y a pas un seul sujet de recherche sur lequel ne travailleraient pas des physiciens de toutes interprétations. Cela est notamment dû au fait que les physiciens ont développé une grande compréhension des autres interprétations et qu'ils utilisent aussi beaucoup plus la pratique consensuelle orthodoxe, même pour la production de leurs travaux.

Voyons comment l'analyse de Kitcher s'applique à ces deux situations. Pour cha-

[27] Il faut noter que les divisions de cette première situation sont d'ordre épistémique, conformément à ce que j'ai annoncé : je m'intéresse aux facteurs d'ordre pratique à condition qu'ils soient d'ordre épistémique.

cune d'elles, il existe une communauté de scientifiques pour laquelle la pratique consensuelle est la pratique issue de l'interprétation orthodoxe. L'accord consensuel se fait, dans les deux cas, seulement de manière instrumentaliste et pragmatique. Remarquons que la pratique consensuelle n'est pas plus étendue dans la seconde situation que dans la première : comme il existe aussi une interprétation particulière à laquelle chaque physicien de la seconde situation croît, leur acceptation de la pratique orthodoxe n'est que pragmatique et instrumentaliste. Dans les deux situations, les physiciens publient souvent leurs articles avec l'interprétation orthodoxe consensuelle. Puisque l'objet du consensus instrumentaliste est le même, l'analyse de Kitcher conduit à conclure que l'unité de la communauté scientifique est la même dans les deux situations.

Or, selon une conception intuitive de ce en quoi consiste l'unité, il semble clair que la première situation est beaucoup plus divisée que la seconde. Il n'existe dans la première situation aucune compréhension, aucune réutilisation des travaux, aucune coopération scientifique, entre les différents laboratoires qui adoptent des interprétations différentes. La pluralité des interprétations a entraîné une division des scientifiques, dont les travaux n'ont plus de lien (ils portent d'ailleurs sur des sous-domaines différents). Le fait qu'ils partagent la même pratique orthodoxe, d'un point de vue instrumentaliste, et le fait qu'ils se fassent confiance sur leurs sous-domaines de recherche respectifs, est tout ce qui unit les physiciens qui adoptent des interprétations différentes[28].

Puisque la conception de l'unité de Kitcher ne parvient pas à distinguer entre les deux situations fictives, elle ne parvient pas à saisir une certaine notion intuitive d'unité. La raison est que l'unité selon Kitcher consiste en un consensus. Or dans l'exemple, on juge intuitivement que la seconde situation est unie grâce à l'existence d'autre chose qu'un consensus : des liens entre les scientifiques et leurs travaux, quelle que soit l'interprétation qu'ils adoptent.

En quoi le fait que l'analyse de Kitcher ne parvienne pas à distinguer entre les deux situations fictives est un problème ? Dans ce chapitre, je pose la question de l'unité de la mécanique quantique d'un point de vue pratique, c'est-à-dire que je cherche à préciser le(s) concept(s) d'unité qui s'applique(nt) à elle. Supposons que la mécanique quantique soit effectivement dans la seconde situation fictive. Nous souhaiterions pouvoir affirmer qu'elle présente une certaine unité — davantage que la

[28] Il est important de noter que, malgré toutes ces différences, les physiciens de la première situation continuent à utiliser la même théorie, au sens de la conception sémantique des théories discutée au chapitre 3.

première situation. Le problème du concept d'unité de Kitcher est qu'il ne peut nous être d'aucun secours ici, puisqu'il ne distingue pas entre les deux situations. C'est pourquoi je vais proposer un nouveau concept d'unité, qui va — entre autres choses — tenter de saisir ce qui fait que nous jugeons intuitivement que la seconde situation est plus unie que le première.

De façon générale, un tel concept doit satisfaire trois contraintes. Tout d'abord, il doit permettre de discriminer entre ces deux situations fictives, en considérant que la seconde est plus unie que la première. La deuxième contrainte est que l'unité doit être positive vis-à-vis de la pluralité des interprétations quantiques : le concept ne peut pas unir le domaine en rejetant ce qui fait la spécificité de chacune d'elles. Enfin, le concept d'unité doit évidemment s'appliquer avec succès au cas de la mécanique quantique, en considérant que ce domaine est uni alors même que la pluralité d'interprétations est une réalité dans la pratique scientifique. Je montre dans les prochaines sections de ce chapitre que les deux premières contraintes sont satisfaites par ma proposition, tandis que la troisième est étudiée dans le chapitre suivant.

2.2 Définition d'une relation de fécondation

La définition de l'unité que je propose s'appuie sur une certaine relation entre les travaux scientifiques, dite « relation de fécondation ». Une étape préliminaire consiste à définir cette relation : c'est le but de cette section 2.2. Je considère ici la recherche scientifique uniquement à travers les travaux publiés. Par « travail », ou de manière synonyme « résultat », j'entends la connaissance produite par les scientifiques, qui se trouve sous la forme d'un article publié. (ce faisant, je reprends le concept de travail présenté au chapitre précédent, section 2). Je m'intéresse ici aux conditions sous lesquelles un travail est produit. C'est un fait bien connu que la production d'un nouveau travail requiert habituellement (d'une façon qui est précisée plus bas) que le scientifique réutilise d'autres travaux déjà réalisés, sur lesquels il s'appuie. Il reconnaît ce fait en citant les articles qu'il réutilise[29]. Afin d'en rendre compte, je propose la définition suivante :

> **Définition :** on dit qu'il existe une *relation de fécondation*, notée $\mathcal{F}$, entre un ancien travail W_{ancien} et un nouveau travail W_{nouveau} dans le cas où la réutilisation de l'ancien travail a permis ou facilité pour le scientifique la

[29] Il existe parfois des pratiques malhonnêtes, comme le fait de ne pas citer un article réutilisé, ou de citer l'article d'un ami dont on ne s'est pas resservi. Je prétends seulement ici que la fonction normale des citations est de reconnaître les réutilisations qui ont été faites.

réalisation du nouveau travail. « Facilité » signifie que, sans cet ancien travail, il aurait été plus difficile pour le scientifique de parvenir au nouveau résultat.

On notera cette relation sous la forme suivante :

$$W_{\text{ancien}} \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{nouveau}} \tag{5.1}$$

Le terme de « réutilisation » est à comprendre en un sens large : il peut s'agir de l'adoption de certains aspects du travail, d'une généralisation, de modifications, de critiques, d'une simple inspiration... Généralement, la réutilisation ne concerne pas la totalité de l'article, mais une partie seulement : une hypothèse, un résultat expérimental, une loi, une formulation mathématique, une méthodologie, une entité... Une relation de fécondation peut être plus ou moins forte, selon que le travail réutilisé a plus ou moins facilité l'obtention du nouveau résultat (la facilité peut être appréciée en terme d'heures de travail standard). En énonçant une relation de fécondation entre deux travaux, on souligne le rôle particulier joué par l'ancien travail. Bien entendu, d'autres facteurs — qu'il s'agisse de moyens financiers, de temps, de conditions matérielles, etc. — sont eux aussi requis pour la réalisation d'un nouveau travail, mais je ne les prends pas en compte ici[30] ; je me restreins aux conditions épistémiques, en cherchant seulement à pointer un élément de connaissance qui a facilité l'obtention d'un nouveau résultat.

De manière synonyme au fait qu'il existe une relation de fécondation entre deux travaux, on pourra dire qu'un travail a été fécond pour un autre. Pourquoi parler de relation de « fécondation » et pas seulement de « réutilisation », puisque c'est sur cela que repose l'essentiel de la définition ? La raison en est que « fécondation » est un terme plus général, qui permet d'englober aussi le rôle que peut jouer une interprétation dans la production d'un travail, ainsi qu'on l'a dit à la section 2.1 du chapitre précédent. La définition que l'on avait donnée était en effet similaire : il s'agissait d'évaluer dans quelle mesure le fait que le scientifique n'ait pas utilisé l'interprétation (ou la pratique qui en est issue) aurait rendu son travail plus difficile. Cela me permet ainsi de dire à la fois que des travaux et des interprétations sont féconds pour la production d'un nouveau travail. Une autre raison pour le choix du terme « fécondation » est que cela se rapproche de « fécondité », qui est un critère

[30] Cela ne veut pas dire que les problèmes qu'ils soulèvent ne méritent pas d'attention : pour la mécanique quantique, voir par exemple le livre de Cushing (1992) et les articles de Freire (2004), (2005), (2006), (2009).

habituel de choix théorique[31], qui a un sens très proche : il signifie que de nouvelles découvertes peuvent être réalisées à partir de la théorie, c'est-à-dire dans les termes employés ici que de nouveaux résultats peuvent être obtenus qui iront au-delà des anciens travaux. Guidé par ces remarques, je propose une définition plus générale de la fécondation :

> **Définition :** un paramètre X est fécond pour la production d'un travail si son utilisation permet ou facilite la production du travail pour le scientifique.

On s'intéresse ici à des paramètres épistémiques. Dans l'utilisation que j'en ai faite jusqu'à présent, X était une interprétation ou un travail scientifique. Comme dans la section 2.1 du chapitre précédent, on peut considérer que X est une *cause* de la production du travail, au sens contrefactuel : si X n'avait pas été utilisé, la production du travail n'aurait pas eu lieu, ou aurait été plus difficile. La relation de fécondation que j'ai définie plus haut entre deux travaux est une instance de cette fécondation plus générale, avec X un ancien travail. De même, la relation de fécondation de la section 2.1 du chapitre précédent, pour laquelle une interprétation sert à la production d'un nouveau travail, est une instance de cette relation plus générale avec X une interprétation quantique.

Un même ancien travail peut être fécond pour plusieurs nouveaux travaux, tandis que divers anciens travaux peuvent être féconds pour un même nouveau travail. On peut donc facilement étendre la définition avec des relations à plusieurs termes et noter par exemple

$$\{W_{\text{ancien},\,i}\}_{i=1,\ldots,n} \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{nouveau}} \tag{5.2}$$

pour indiquer que n anciens travaux ont été réutilisés pour la réalisation du nouveau travail.

Un exemple d'une relation de fécondation peut être donnée à propos du travail de Deutsch et Jozsa (1992), que j'ai présenté au chapitre précédent, section 3.1. L'obtention de cet algorithme quantique a été possible grâce à des résultats établis par Deutsch (1985) : leur démonstration se sert notamment du fait qu'une certaine opération mathématique peut être réalisée par un ordinateur quantique en un nombre fini d'étapes, qui a été démontré dans Deutsch (1985)[32] ; leur algorithme s'appuie

[31] Cf. par exemple Kuhn (1977), p. 426-427, (2000), p. 251.
[32] Cf. Deutsch et Jozsa (1992), p. 556 ; ils y renvoient explicitement.

aussi de façon plus fondamentale sur le concept d'ordinateur quantique que Deutsch a proposé en 1985. L'algorithme de Deutsch et Jozsa (1992) aurait donc été beaucoup plus difficilement obtenu si le travail de Deutsch (1985) n'avait pas été fait quelques années plus tôt : il leur aurait fallu redémontrer la propriété en question, sans même parler du fait que Deutsch et Jozsa n'auraient peut-être même pas envisagé travailler sur ces algorithmes quantiques. On peut donc affirmer qu'il existe une relation de fécondation entre l'article de Deutsch (1985) et celui de Deutsch et Jozsa (1992), que l'on note :

$$W_{\text{Deutsch 1985}} \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Deutsch Jozsa 1992}}. \tag{5.3}$$

2.3 Définition d'une unité par la fécondation

La section précédente a permis d'établir une relation de fécondation entre des travaux scientifiques, l'un étant ancien et l'autre nouveau (ou plus généralement entre un paramètre X jouant un rôle épistémique et un nouveau travail scientifique). En m'appuyant sur cette relation, je propose à présent la définition d'une nouvelle unité en pratique. Commençons par décrire de façon informelle les contours du nouveau concept d'unité. La relation de fécondation présentée dans la section précédente introduit des liens entre les différents travaux scientifiques. Ces liens induisent une certaine unité dans la production scientifique du domaine. Je voudrais considérer que le domaine est désuni à cause de la pluralité des interprétations si celle-ci venait casser cette unité en empêchant certains liens d'exister, c'est-à-dire en gênant la fécondation des travaux. Ce serait le cas par exemple si les scientifiques ne pouvaient réutiliser que les articles rédigés dans l'interprétation qu'ils adoptent eux-mêmes. Je souhaite donc mettre une contrainte pour empêcher que ce ne soit toujours la même interprétation qui intervienne dans des travaux reliés par une relation de fécondation. Il n'est cependant pas possible d'exiger que les interprétations puissent être interchangeables, de manière générale. En effet, dans la section 2.1 du chapitre précédent, j'ai précisément mis en évidence qu'une interprétation peut jouer un rôle déterminant et irremplaçable dans la *production* de certains travaux. Ce qu'il est possible d'exiger, en revanche, c'est une certaine interchangeabilité ou transparence pour l'interprétation qui figure dans la *publication* du travail. J'en viens à la proposition suivante :

> **Définition :** un domaine de recherche est dit *uni par la fécondation vis-à-vis des interprétations de la théorie* si l'interprétation (ou la pratique

> qui en est issue) mise en jeu dans la publication d'un travail n'est pas un obstacle à ce que ce travail puisse être fécond pour un nouveau travail.

Autrement dit, il ne faut pas que la fécondité d'un article ait été empêchée à cause de l'interprétation particulière qui a été utilisée pour sa publication, alors qu'il aurait été fécond plus facilement s'il avait été rédigé avec une autre interprétation. Par exemple, il ne faut pas que l'interprétation utilisée dans un article empêche le scientifique qui le lit de pouvoir le comprendre et le réutiliser de manière féconde. On retrouve la condition informelle que l'on souhaitait, à savoir le fait que la pluralité des interprétations ne doit pas diviser la recherche à cause des interprétations diverses.

Faisons quelques remarques sur cette définition. L'unité proposée est une notion en pratique et factuelle, dans la mesure où elle concerne ce que les scientifiques ont pu faire concrètement dans des situations historiques, à la lecture de certains articles rédigés de certaines façons. C'est une unité qui vient par degrés, selon que les interprétations gênent plus ou moins la réutilisation d'un travail et selon la fréquence de la réutilisation. La définition demande implicitement de comparer la difficulté liée à la réutilisation de l'article par rapport au cas où cette interprétation n'aurait pas été utilisée. Elle repose sur le présupposé qu'un même article peut être rédigé selon des interprétations différentes. Notons que le concept proposé laisse de côté une autre forme d'unité. Avec cette définition, les scientifiques pourraient tout de même être divisés de la façon suivante : en fonction de l'interprétation qu'ils adoptent, ils ne publieraient pas dans les mêmes journaux, et ne liraient que les journaux liés à leur interprétation. Ainsi, ils n'auraient tout simplement pas l'occasion de lire, de comprendre et de réutiliser des articles écrits avec d'autres interprétations. Une telle notion de division est pertinente, mais elle n'entre pas dans le cadre que je me suis fixé ici : elle ne concerne pas les contraintes d'ordre épistémique sur la compréhensibilité de la connaissance, mais elle a à voir avec la structure sociale de la science[33]. Ainsi, l'unité que j'ai proposée ne sera pas prise en défaut si des scientifiques n'ont pas eu accès à un article donné et n'ont donc pas pu le réutiliser. Ce qui importe est que, s'ils ont connaissance de l'article, ils soient en mesure d'en tirer une fécondité en dépit de l'interprétation particulière utilisée pour sa publication et de celle qu'ils utilisent pour la production de leur nouveau travail. Enfin, on remarque que cette notion d'unité porte sur les travaux et non pas sur les scientifiques. En cela, on s'écarte légèrement de Kitcher qui considérait que l'unité devait concerner aussi les scientifiques (par exemple, on en venait à statuer si un scientifique faisait partie de la communauté).

[33] Je discuterai de questions de structure sociale et d'épistémologie sociale de la science dans la troisième partie.

Néanmoins, le fait pour un domaine de recherche d'être uni dépendra des capacités des scientifiques qui travaillent dans le domaine et pas seulement de l'ensemble des articles publiés : étant donné des articles publiés avec des interprétations différentes, des scientifiques qui ne connaissent rien aux interprétations en question ne pourraient pas les réutiliser avec profit et le domaine de recherche serait désuni ; mais s'ils les comprenaient parfaitement, la fécondité de ces articles ne serait pas empêchée et le domaine pourrait être uni.

La définition de l'unité s'appuie implicitement sur une distinction qui a été faite au chapitre précédent (section 3) : l'interprétation peut jouer un rôle en pratique de deux façons, dans la production ou dans la publication d'un travail. Dans la production d'un travail, un scientifique est susceptible d'utiliser avec profit des interprétations — celle pour laquelle il milite éventuellement, ou d'autres avec lesquelles il travaille — à la fois comme incitation ou comme aide. Lors de cette production d'un nouveau travail, il peut aussi souhaiter réutiliser des articles, rédigés éventuellement avec d'autres interprétations. Le concept d'unité par la fécondation veut qu'il n'y ait pas d'obstacle à la fécondation à cause de cette diversité d'interprétations. Notamment, il ne faut pas qu'il y ait de gêne entre l'interprétation qui joue un rôle dans la publication de l'ancien travail et la production du nouveau travail. Autrement dit il faut que, face à une diversité d'interprétations, ce qui est à la fois particulier d'un point de vue interprétatif et en même temps public ne gêne pas la production ultérieure, qui peut avoir besoin de s'appuyer sur une interprétation particulière différente.

La définition proposée a été explicitement conçue pour traiter de la question de l'unité vis-à-vis de la pluralité des interprétations. Elle peut être facilement généralisée pour donner un concept d'unité vis-à-vis d'autres paramètres. Un tel paramètre X ne peut pas être quelconque : afin que l'unité soit d'ordre pratique, on doit exiger que X joue un vrai rôle en pratique dans la recherche. Pour cela, on requiert simplement que X doit être parfois fécond dans la production de travaux, selon la définition donnée à la section 2.2 : pour des travaux pour la production desquels le scientifique a utilisé X, il aurait été plus difficile pour le scientifique de produire ces travaux sans utiliser X. L'unité qu'on souhaite mettre en évidence va surgir en dépit d'une certaine pluralité : il faut que le paramètre X puisse exister sous plusieurs formes, notées X_i, de la même façon qu'il existe une pluralité d'interprétations. On en arrive à la définition suivante :

> **Définition :** Soit X un paramètre qui peut être fécond pour la production de travaux et qui admet plusieurs formes X_i. Un domaine de recherche est dit *uni par la fécondation vis-à-vis de* X si le X_i mis en jeu dans la

publication d'un travail n'est pas un obstacle à ce que ce travail puisse être fécond pour un nouveau travail.

Cette définition générale permet de s'intéresser à tout un ensemble de paramètres X possibles, autres que l'interprétation de la théorie. On peut chercher à savoir si un domaine de recherche est uni par la fécondation vis-à-vis des diverses formulations mathématiques équivalentes d'une théorie, des approches méthodologiques diverses liées à des écoles scientifiques différentes, des formats des représentations[34], des styles de raisonnement, des traditions expérimentales... En général, ces paramètres ont été étudiés pour eux-mêmes dans la littérature. La définition de l'unité que je propose permet à présent de donner en sens pour l'unité d'un domaine scientifique confronté à une pluralité de ces paramètres. Par exemple, un domaine de recherche où plusieurs styles de raisonnement sont employés peut-il être uni par la fécondation ? Cela pourrait conduire à de nombreuses études détaillées pour des domaines de recherche et des périodes précises. Dans cette thèse, j'étudie seulement le cas des interprétations de la mécanique quantique contemporaine, dans la section 3. Les paramètres X acceptables et intéressants sont ceux qu'un scientifique peut utiliser avec profit pour produire des travaux et qui existent sous diverses formes. L'idée générale de l'unité proposée est que, tant que l'utilisation de cette pluralité de X_i ne gêne pas et ne remet pas en cause la fécondité des travaux, on peut considérer le domaine de recherche comme étant uni. C'est seulement si cette pluralité des formes X_i venait gêner et remettre en cause ces relations de fécondation qu'il faudrait considérer le domaine comme divisé. Notons qu'on s'intéresse ici à des questions d'ordre épistémique (on pourrait indiquer explicitement dans la définition de l'unité que X doit être épistémique). Cependant, je ne vois pas d'obstacle particulier à ce que X soit non-épistémique : on pourrait étudier par exemple l'unité vis-à-vis de la position hiérarchique des scientifiques, de leur sexe, de leur nationalité.

Les questions normatives liées à cette unité, visant à apprécier si une telle unité est bonne pour le domaine de recherche et en quel sens ce qualificatif doit être compris, seront abordées dans la troisième partie de cette thèse.

2.4 Commentaires sur cette notion d'unité par la fécondation

Je vais faire à présent quelques commentaires plus généraux sur le concept d'unité que j'ai défini. Dans un premier temps, je détaille en quoi cette unité se distingue de

[34] Cf. Vorms (2009).

celle fondée sur le consensus (section 2.4.1), puis je la compare avec d'autres positions philosophiques (section 2.4.2).

2.4.1 Comparaison avec l'idée d'une unité comme consensus

La conception de l'unité que j'ai proposée se fonde sur la fécondation entre des travaux scientifiques, qui est une notion construite au moyen d'une relation. C'est parce qu'il existe des liens particuliers entre des travaux qu'un domaine de recherche sera uni. Cette relation peut être qualifiée de dynamique, dans la mesure où les travaux engagés dans une relation sont temporellement décalés : ce sont d'anciens travaux qui sont réutilisés pour la production d'un nouveau travail. En cela, cette unité se différencie d'une unité consensuelle qui doit réunir ce qu'acceptent les physiciens à un instant donné : il s'agit là d'une notion statique, fixant un instantané de l'état de la discipline. Avec l'unité par la fécondation, les liens entre des travaux anciens et d'autres plus récents assurent aussi une unité à travers le temps et par conséquent une certaine continuité de la discipline. Contrairement à l'unité consensuelle, il n'existe pas de corpus fixé qui soit le reflet de la discipline à un instant donné : les physiciens sont libres de choisir les travaux qu'ils réutilisent.

L'unité par la fécondation que j'ai proposée satisfait la deuxième contrainte que j'ai imposée à la fin de la section 2.1, à savoir le fait qu'il s'agisse d'une unité positive envers la pluralité des interprétations. Je veux dire par là que le domaine de recherche de la mécanique quantique doit être uni sans exclure la diversité des interprétations (contrairement à l'unité consensuelle, qui repose sur l'abandon des spécificités des différentes interprétations). C'est le cas ici : l'unité par la fécondation suppose que les scientifiques puissent réutiliser des travaux publiés avec des interprétations variées. C'est donc parce que la pluralité interprétative est permise parmi les scientifiques que l'unité peut exister. L'unité que je propose est donc positive vis-à-vis de la pluralité des interprétations quantiques et elle dépasse la critique adressée à l'unité consensuelle.

Je vais montrer à présent que la première contrainte que j'ai imposée est également satisfaite : le concept d'unité par la fécondation permet de distinguer les deux situations fictives de la section 2.1. Les deux situations ont en commun que la théorie de la mécanique quantique admet plusieurs interprétations et que les physiciens reconnaissent tous de manière instrumentaliste et pragmatique une pratique issue d'une interprétation orthodoxe. Dans la première situation, les physiciens sont regroupés en fonction de l'interprétation qu'ils adoptent, ils publient avec cette interprétation et sont incapables de comprendre et de réutiliser les articles écrits avec une autre

interprétation. Dans la seconde situation au contraire, les physiciens comprennent parfaitement les articles écrits avec n'importe quelle interprétation et peuvent les réutiliser. Maintenant qu'un critère d'unité par la fécondation a été donné, il est clair que la première situation n'est pas unie selon ce critère et que la seconde l'est. Rappelons que le critère d'unité consensuelle de Kitcher ne permet pas de distinguer entre les deux situations. Ainsi, le critère d'unité par la fécondation permet de saisir une différence là où l'approche consensuelle ne le permet pas, en l'occurence de satisfaire la première contrainte que j'ai imposée.

Étudions à présent de façon plus générale le rapport entre l'unité par la fécondation que j'ai proposée et l'unité consensuelle de Kitcher. L'une d'elle est-elle incluse dans l'autre, ce qui en fait une notion plus fine ? Je vais montrer que les deux notions d'unité ne sont pas dans cette relation, mais au contraire qu'elles sont complémentaires l'une de l'autre. La discussion ci-dessus à propos des deux situations fictives permet de dire qu'il existe des cas où un domaine de recherche est uni à la fois par la fécondation et pour le consensus (la seconde situation), et parfois uni seulement pour le consensus et pas pour la fécondation (la première situation). Je vais à présent proposer une troisième situation fictive qui est unie par la fécondation, mais qui ne l'est pas pour le consensus. Considérons une théorie appelée la mécanique quantique qui admet plusieurs interprétations. Les scientifiques adoptent chacun une interprétation, ainsi que toute la pratique qui en est issue, telle qu'elle a été définie au chapitre précédent (section 1). Notamment, leurs articles sont toujours rédigés avec leur interprétation préférée, sa formulation mathématique particulière, etc. À la différence du constat que j'ai dressé pour la situation actuelle en mécanique quantique, les scientifiques ne reconnaissent pas de façon instrumentaliste une pratique particulière. Ainsi, il n'existe pas de pratique scientifique qui soit consensuelle dans cette troisième situation, et elle n'est pas unie selon l'analyse de Kitcher. Poursuivons la description de cette situation. Tous les scientifiques sont parfaitement capables de comprendre les autres interprétations, leurs formulations mathématiques et tout le reste des pratiques issues des interprétations, de sorte qu'ils n'ont aucun mal à comprendre les articles rédigés avec d'autres interprétations que la leur et à les réutiliser avec profit. La fécondation n'est donc pas gênée par l'interprétation qui figure dans les articles publiés. Ainsi, le domaine de recherche est uni par la fécondation, avec la définition que j'en ai proposée. On a ainsi une situation où les travaux peuvent être féconds sans entrave, mais où les scientifiques ne partagent rien de façon consensuelle et travaillent avec des formulations et des interprétations de la théorie différentes. Cet exemple pourrait correspondre à une situation dégénérée de la mécanique quantique actuelle :

ce serait le cas où la pratique issue de l'algorithme (ou orthodoxe) ne serait même plus consensuelle de façon instrumentaliste.

Comparons à présent cette troisième situation avec la première : selon le concept de l'unité par la fécondation, ces situations sont toutes les deux unies (il ne permet pas donc de faire de différence) ; le concept d'unité consensuelle de Kitcher, de son côté, considère que l'une est unie tandis que l'autre est divisée. Cela permet de conclure que les concepts d'unité par la fécondation et d'unité consensuelle ne sont pas dans une relation d'inclusion l'un envers l'autre. Il existe tous les cas possibles : certaines situations peuvent être unies pour un concept d'unité et pas pour l'autre. Ces deux concepts d'unité sont donc complémentaires. Tous les deux sont utiles pour analyser l'unité d'un domaine de recherche d'un point de vue pratique. Ils saisissent tous les deux des traits différents de ce qu'on considère intuitivement comme caractérisant l'unité.

2.4.2 Comparaison avec d'autres positions

Dans cette section, je fais encore quelques commentaires sur ma notion d'unité par la fécondation, en mettant en évidence certains points de sa définition (ou des présupposés sur lesquels elle repose) et en les comparant avec des analyses philosophiques ou historiques existantes. Il s'agit d'une brève comparaison, dont l'objectif consiste surtout à indiquer des pistes d'approfondissement pour un futur travail.

Le concept d'unité par la fécondation s'appuie sur l'existence de relations de fécondation entre des travaux scientifiques. Ce faisant, je fais de la réutilisation des anciens travaux scientifiques la base de la dynamique de la recherche scientifique et de son unité. Je me rapproche ainsi des analyses défendues par deux auteurs, Kuhn et Beller. Le premier a insisté dans son ouvrage *La Structure des Révolutions Scientifiques* (1962/1970) sur le fait que certains travaux scientifiques majeurs (« paradigmatiques ») sont reconnus par une communauté de scientifiques, qui s'en ressert pour la suite de ses travaux. Kuhn insiste surtout sur la réutilisation des travaux majeurs ; de mon côté, je permets qu'elle concerne aussi des travaux plus mineurs — la réutilisation est considérée comme un élément de base du travail scientifique quotidien. Kuhn considère aussi que la réutilisation des travaux scientifiques est surtout une *acceptation* de certains engagements ou de certains présupposés : par exemple, elle consiste à reprendre une loi, un concept, une méthodologie, un instrument de mesure... Ma définition de la fécondation autorise que la réutilisation se fasse sur la base d'un désaccord, qu'elle soit une modification ou une critique. Par exemple, un

résultat jugé incorrect peut être une incitation à travailler sur un nouveau résultat qu'on espère être différent.

De son côté, Beller a développé dans son ouvrage *Quantum Dialogue* (1990), qui est une étude historique des débuts de la mécanique quantique, l'idée selon laquelle la recherche scientifique peut fonctionner sous forme d'un « dialogue » entre des approches différentes et compétitives. Ces approches communiquent néanmoins : les travaux sont critiqués ou repris de manière sélective. Ma conception de l'unité partage avec Beller l'idée que la réutilisation des travaux n'est pas nécessairement une adoption pleine et entière. Je souscris aussi au fait que cette réutilisation peut être partielle, en concernant seulement un aspect du travail en question (une hypothèse théorique, un concept, etc) et non pas sa globalité. Je partage aussi son idée que la recherche ne suppose pas qu'il existe un accord sur les fondements de la discipline — il n'y a pas besoin qu'un dogme soit partagé par tous les protagonistes. Cependant, je me détache de Beller en ne mettant pas seulement l'accent sur le désaccord : la communauté de vues peut aussi être un moteur de la recherche. Là où elle plaide en faveur d'une pluralité d'approches distinctes et alternatives, je maintiens qu'il existe une limite pour qu'une unité se maintienne dans la discipline : ces approches doivent être fécondes et les travaux réutilisables. De façon générale, on peut considérer que mon concept d'unité par la fécondation formalise une notion d'unité qui est implicite chez Beller, tout en en proposant une définition plus générale.

Conclusion

Afin de compléter l'analyse de Kitcher qui propose un concept d'unité consensuelle, cette section a présenté un nouveau concept d'unité pour la recherche scientifique envisagée d'un point de vue pratique. Il repose sur une relation dite de « fécondation » entre des travaux scientifiques, qui existe lorsque la réutilisation d'un ancien travail facilite la réalisation d'un nouveau travail pour le scientifique. J'ai proposé de considérer qu'un domaine scientifique est « uni par la fécondation », vis-à-vis des interprétations de la théorie, si l'interprétation mise en jeu dans la publication d'un travail n'est pas un obstacle à ce que ce travail puisse être fécond pour un autre travail. J'ai également proposé une généralisation des définitions de la relation de fécondation et de l'unité par la fécondation, afin qu'elles puissent concerner d'autres paramètres épistémiques que les seules interprétations quantiques. J'ai montré qu'il faut considérer mon concept d'unité par la fécondation comme étant *complémentaire* de celui d'unité consensuelle de Kitcher. Les deux sont utiles pour analyser l'unité

d'un domaine scientifique et en soulignent des caractéristiques différentes.

3 L'unité par la fécondation de la mécanique quantique

Le but de ce chapitre est d'étudier la question de savoir si la mécanique quantique est un domaine de recherche uni d'un point de vue pratique, étant donné la pluralité d'interprétations qui existe dans la pratique scientifique. Il s'agit d'identifier, le cas échéant, le(s) concept(s) d'unité qui peut (peuvent) s'y appliquer. Après avoir montré certains limites du concept d'unité consensuelle de Kitcher, j'en suis venu à proposer un nouveau concept d'unité, qui repose sur la fécondation entre les travaux scientifiques (section 2). Or à la fin de la section 2.1, j'ai défini trois contraintes qu'un nouveau concept d'unité devrait remplir. La section 2.4.1 a établi que mon concept d'unité par la fécondation satisfait les deux premières contraintes. Cette section 3 a pour but d'établir que la troisième contrainte, qui est de loin la plus importante, est vérifiée : il s'agit de montrer que ce concept d'unité s'applique effectivement au cas de la mécanique quantique. C'est la thèse que je souhaite défendre à présent. Cela doit me permettre de conclure que la mécanique quantique est unie au sens de la fécondation, en plus de l'être au sens du consensus selon Kitcher.

Pour cela, il s'agit d'évaluer dans quelle mesure le domaine de la mécanique quantique respecte la définition de l'unité proposée à la section 2.3 : les interprétations qui se trouvent dans les articles publiés sont-elles un obstacle à leur réutilisation et leur fécondité ? La réponse à cette question est par nature délicate, car la définition de l'unité invite à considérer potentiellement tous les travaux existants et leurs relations de fécondation. Cela suppose de rechercher si des relations de fécondation existantes ont été rendues plus difficiles à cause de l'interprétation et si d'autres relations de fécondation ont été manquées. Ce dernier point est particulièrement difficile à établir et je ne tenterai pas d'écrire une histoire contrefactuelle pour les développements de la recherche[35]. Au lieu de chercher à vérifier littéralement cette définition, je vais montrer qu'il y a de bonnes raisons de penser qu'elle s'applique dans le cas de la mécanique quantique. J'avance deux arguments : le premier est que, étant donné la façon dont les articles sont publiés dans le domaine, les scientifiques sont actuellement équipés pour les comprendre (section 3.1) ; le second est qu'il existe de nombreux exemples

[35]Pour une réécriture historique contrefactuelle du développement interprétatif de la mécanique quantique, voir par exemple le chapitre 10 de Cushing (1994), intitulé « An Alternative Scenario ? ». Il considère ce qu'aurait été la mécanique quantique si l'interprétation de Bohm avait été proposée avant celle de Copenhague. Pour une réponse à certaines de ces positions, voir par exemple Saunders (2005).

de scientifiques qui travaillent avec une interprétation et qui ont réutilisé des travaux écrits avec des interprétations différentes, ce qui suggère que les éventuelles difficultés ne sont pas grandes (section 3.2). Ainsi, la section 3.1 donne des raisons de principe, tandis que la section 3.2 fournit des exemples concrets.

3.1 La compréhension et la réutilisation des articles

Dans cette section, je suggère que la compréhension et la réutilisation des articles est possible en mécanique quantique, étant donné les compétences des scientifiques et la façon dont les articles sont rédigés. Autrement dit, l'argument est qu'il n'existe pas de barrière particulière à ce que la fécondation (et donc l'unité) puisse exister. Comme la définition de l'unité prend en compte l'interprétation qui figure dans les articles publiés, il est utile de distinguer deux types d'articles.

Le premier type réunit les articles qui sont rédigés avec l'interprétation orthodoxe minimale (ou plus exactement la pratique qui en est issue) : il s'agit de l'immense majorité des articles publiés en mécanique quantique. Leur réutilisation ne pose de problème particulier à aucun scientifique pour la simple raison qu'elle fait appel à la pratique scientifique consensuelle, ainsi que je l'ai établi dans la section 1.2. Elle peut être utilisée par tous, en étant acceptée de manière au moins instrumentaliste. Nous avons vu que, à défaut d'être neutre du point de vue interprétatif, cette pratique orthodoxe minimale est neutre du point de vue de la tradition de la communauté scientifique, qui la considère comme la façon standard de rédiger un article, sans prendre de parti interprétatif.

La seconde catégorie d'articles réunit ceux qui contiennent des éléments d'autres interprétations (ou des pratiques qui en sont issues). Très peu d'articles sont dans ce cas : j'ai donné quelques exemples dans le domaine de recherche du calcul quantique et dans celui fondements de la théorie (au chapitre précédent, section 3). J'ai indiqué à cette occasion que ces articles font en général un usage plutôt sobre des éléments d'une pratique interprétative non-orthodoxe. Typiquement, la formulation mathématique habituelle est utilisée et il n'y a que quelques commentaires interprétatifs supplémentaires. C'est par exemple le cas de Deutsch (1985), dont nous avons vu qu'il met en jeu l'interprétation des mondes multiples. Celle-ci intervient notamment quand Deutsch présente l'idée d'un calcul dans des mondes en parallèles, puis lorsqu'il défend l'idée que cette interprétation est la seule à même d'expliquer la plus grande rapidité des algorithmes quantiques, comparés aux algorithmes classiques[36].

[36]Pour une critique de cette thèse, voir par exemple Steane (2003) et Duwell (2007).

Il emploie seulement quelques termes comme « univers » ou « parallélisme quantique », qui peuvent être facilement compris par tous les scientifiques, dès lors qu'ils savent que des univers différents seront simplement associés aux différents termes d'une décomposition d'un vecteur d'état. Même lorsqu'ils sont d'ardents défenseurs d'une interprétation, les scientifiques font en général en sorte de ne pas employer de formulations mathématiques ou de termes qui soient trop spécifiques à leur interprétation.

Je vois un seul cas dans lequel des articles écrits avec des interprétations non-orthodoxe peuvent ne pas être compréhensibles par tous les physiciens. Cela concerne les articles dont le seul but est de développer une interprétation particulière et son formalisme mathématique. Peut-être s'agit-il des seuls articles qui ne peuvent pas être compris et réutilisés par tous, dans la mesure où les scientifiques n'ont pas la maîtrise de ces interprétations. Notons cependant que ces articles sont extrêmement peu nombreux et qu'ils doivent être parfois considérés comme philosophiques plutôt que comme scientifiques. Par ailleurs, comme ces articles ont pour but de développer l'interprétation en question, ils n'auraient de toute façon pas pu être écrits sans la mettre en jeu. Or il s'agit, je l'ai indiqué, d'une condition implicite pour que la difficulté liée à la réutilisation de l'article soit évaluée, dans la définition de l'unité par la fécondation. Ces articles ne sont donc pas concernés par les conditions requises par la définition de l'unité.

3.2 Exemples de relations de fécondation avec des interprétations différentes

La section précédente a donné de bonnes raisons de penser que la compréhension et la réutilisation des articles est possible quelle que soit l'interprétation utilisée pour la publication. Cette section 3.2 va maintenant en fournir des exemples positifs.

Je veux commencer par dire un mot des exemples qui peuvent être considérés comme pertinents. En exigeant que l'interprétation d'un article publié ne gêne pas la réutilisation de cet article par les scientifiques, la définition de l'unité par la fécondation met en relation deux interprétations : celle de l'article publié et celle qui joue un rôle dans la production du nouveau travail par le scientifique, ou bien comme incitation ou bien comme aide[37]. Il semble assez naturel qu'il n'y ait pas de gêne particulière dans la relation de fécondation si ces deux interprétations sont identiques ; les problèmes risquent de se présenter si elles sont différentes. Ainsi, s'il existait de

[37]Cf. section 2.1 du chapitre précédent pour la définition de ces deux rôles d'incitation ou d'aide.

nombreuses relations de fécondations entre des travaux qui mettent en jeu des interprétations différentes, cela suggérerait fortement que la gêne dans la réutilisation des articles n'est pas grande. Considérons la relation de fécondation suivante, notée selon la formalisation de la section 2.2 :

$$W_{\text{vieux}}(I_{\text{prod, vieux}}, I_{\text{publi, vieux}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{nouveau}}(I_{\text{prod, nouveau}}, I_{\text{publi, nouveau}}) \tag{5.4}$$

Les exemples de travaux intéressants sont ceux pour lesquels l'interprétation qui joue un rôle dans la publication de l'ancien article, $I_{\text{publi, vieux}}$, est différente de celle qui joue un rôle dans la production du nouvel article, $I_{\text{prod, nouveau}}$. Graphiquement, sur la relation ci-dessus, il faut que les interprétations proches ne soient pas les mêmes :

$$W_{\text{vieux}}(I_{\text{prod, vieux}}, \underbrace{I_{\text{publi, vieux}}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{nouveau}}(\underbrace{I_{\text{prod, nouveau}}}, I_{\text{publi, nouveau}}) \tag{5.5}$$

différence ?

Je propose d'appeler de telles relations des relations de fécondation *hétérogènes* vis-à-vis des interprétations.

Résumons cette discussion. S'il existe des exemples de relations de fécondation hétérogènes, cela montre que les scientifiques ne sont pas gênés par les éléments interprétatifs de l'ancien travail qu'ils réutilisent, alors même qu'ils travaillent avec une autre interprétation pour un nouvel article. Il s'agit donc d'exemples qui satisfont la définition de l'unité par la fécondation. Si ces exemples sont représentatifs, cela donne de bonnes raisons de penser que le domaine scientifique est uni vis-à-vis de la fécondation. Aussi, pour montrer l'unité de la mécanique quantique, je présente dans les sections suivantes des exemples significatifs de relations de fécondation hétérogènes interprétativement[38].

[38] Il s'agit là d'une caractéristique générale qui peut être recherchée dans tout domaine scientifique dont on souhaiterait montrer l'unité, selon la définition pour un paramètre X général proposée à la section 2.3 : il suffit de rechercher des exemples significatifs de relations de fécondation hétérogènes, c'est-à-dire qui mettent en jeu des travaux majeurs, dans lesquels le X_i utilisé dans la publication de l'article réutilisé est différent du X_j dont le scientifique se sert pour la production du nouveau travail.

3.2.1 Exemples dans le domaine du calcul quantique

Dans cette section, je présente des exemples de relations de fécondation hétérogènes issus du domaine du calcul quantique, dont plusieurs travaux ont été présentés dans la section 3 du chapitre précédent. À cet endroit, j'ai indiqué les interprétations qui jouent un rôle, ou bien dans la production du travail, ou bien dans sa publication, de sorte qu'il me suffit à présent de justifier l'existence de relations de fécondation entre ces travaux.

J'ai déjà montré à la section 2.2 qu'il existe une relation de fécondation entre l'article de Deutsch (1985) et celui de Deutsch et Jozsa (1992). On peut l'écrire de façon plus complète :

$$W_{\text{Deutsch 1985}}(I_{\text{Everett}}, I_{\text{Everett}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Deutsch Jozsa 1992}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{information}}, I_{\text{ortho min}}) \tag{5.6}$$

Il s'agit d'une relation de fécondation hétérogène vis-à-vis des interprétations, puisque les interprétations qui servent à la production du nouveau travail, $I_{\text{Everett}} + I_{\text{information}}$ sont différentes et plus riches que celle qui joue un rôle dans la publication du travail réutilisé, I_{Everett}.

L'algorithme de Deutsch et Jozsa est ensuite réutilisé par Berthiaume et Brassard pour leur article de 1994. En ajoutant l'hypothèse d'oracles capables de répondre à des questions données, ils rendent cet algorithme encore plus performant. Ils reconnaissent la réutilisation en disant par exemple qu'ils

> « s'appui[ent] sur le travail de Deutsch et Jozsa »[39]

On peut écrire une relation de fécondation entre ces deux travaux qui, avec les interprétations indiquées à la section 3 du chapitre précédent, prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} &W_{\text{Deutsch Jozsa 1992}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{information}}, I_{\text{ortho min}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Berthiaume Brassard 1994}}(I_{\text{information}}, I_{\text{ortho}}) \end{aligned} \tag{5.7}$$

Cette relation est un exemple en faveur de l'unité, dans la mesure où $I_{\text{ortho min}}$ de la publication est différent du $I_{\text{information}}$.

À son tour, l'algorithme de Berthiaume et Brassard est réutilisé par Simon, qui apprécie la reformulation des problèmes dans la théorie de la complexité[40]. Il propose

[39] Berthiaume et Brassard (1994), p. 2521.

[40] Simon a écrit son article de 1994 alors qu'il terminait son Ph. D. avec Brassard et a ensuite été recruté par Microsoft. Cf. Simon (1994), p. 116.

ainsi un algorithme quantique permettant de déterminer la période d'une fonction. On peut écrire la relation suivante :

$$W_{\text{Berthiaume Brassard 1994}}(I_{\text{information}}, I_{\text{ortho}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Simon 1994}}(I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \quad (5.8)$$

Bien que l'écriture de cette relation fasse apparaître la même interprétation orthodoxe (dans sa version minimale ou non) et ne puisse pas être véritablement qualifiée d'« hétérogène », il faut noter néanmoins que Simon n'emploie pas vraiment cette interprétation minimale de l'algorithme avec une approche de physicien. Plutôt, il aborde le problème en tant qu'informaticien théorique : l'interprétation physique des symboles n'a pas particulièrement de signification pour lui[41] — bien qu'on ait noté que c'est l'interprétation $I_{\text{ortho min}}$ qui joue un rôle chez Simon (1994), ce rôle est très faible. Ainsi, cette relation peut être vue comme une fécondation entre les approches de physiciens et d'informaticiens théoriques, au sein même de l'interprétation orthodoxe minimale ; elle témoigne de la fécondité des approches entre champs disciplinaires différents.

Shor réutilise ensuite l'algorithme de Simon, le généralisant au problème de la factorisation et des logarithmes discrets. Shor reconnaît que

> « L'algorithme de Simon a inspiré [son] travail. »[42]

et Simon le confirme, disant que Shor a récemment « eu recours » à son travail, et qu'il a ajouté de « nombreuses sophistications additionnelles »[43]. Shor remercie d'ailleurs Simon pour les nombreuses discussions productives qu'il a eues avec lui. On peut donc écrire la relation de fécondation hétérogène

$$W_{\text{Simon 1994}}(I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Shor 1994}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \quad (5.9)$$

Griffiths et Niu ont ensuite proposé une reformulation substantielle de l'algorithme de Shor. On a :

$$W_{\text{Shor 1994}}(I_{\text{Everett}}+I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Griffiths Niu 1996}}(I_{\text{hist décoh}}+I_{\text{ortho min}}, I_{\text{hist décoh}}) \quad (5.10)$$

Ces exemples de relations de fécondation peuvent être mis bout-à-bout pour former une chaîne de fécondation (figure 5.1).

[41] Je renvoie au précédent chapitre, section 3.1.
[42] Shor (1994), p. 4.
[43] Simon (1994), p. 117 et 121.

$$
\begin{array}{ll}
 & W_{\text{Deutsch 1985}}(I_{\text{Everett}}, I_{\text{Everett}}) \\
\mathcal{F} & \downarrow \\
 & W_{\text{Deutsch Jozsa 1992}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{information}}, I_{\text{ortho min}}) \\
\mathcal{F} & \downarrow \\
 & W_{\text{Berthiaume Brassard 1994}}(I_{\text{information}}, I_{\text{ortho}}) \\
\mathcal{F} & \downarrow \\
 & W_{\text{Simon 1994}}(I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \\
\mathcal{F} & \downarrow \\
 & W_{\text{Shor 1994}}(I_{\text{Everett}} + I_{\text{ortho min}}, I_{\text{ortho min}}) \\
\mathcal{F} & \downarrow \\
 & W_{\text{Griffiths Niu 1996}}(I_{\text{hist décoh}} + I_{\text{ortho}}, I_{\text{hist décoh}})
\end{array}
$$

FIGURE 5.1 – Un exemple d'une chaîne de travaux féconds dans le domaine du calcul quantique, construite à partir des exemples précédents.

Cet aspect linéaire ne doit pas être pris trop littéralement : on peut en fait mettre en évidence d'autres relations de fécondation pour chacun des travaux, ou bien avec les travaux indiqués ici, ou bien avec d'autres. La structure géométrique la plus fidèle à la réalité des liens de fécondation est certainement celle d'un réseau, dans lequel chaque nœud représentant un travail est relié à plusieurs anciens nœuds[44]. L'aspect linéaire vient ici du fait que j'ai sélectionné seulement quelques relations de fécondation parmi toutes celles qui existent dans le réseau

D'autres relations de fécondation et d'autres chaînes pourraient être construites dans le domaine du calcul quantique, qui mettent en jeu des travaux dont l'interprétation utilisée dans la publication de l'ancien travail est différente de celle utilisée dans la production du nouveau travail. Le domaine du calcul quantique semble avoir ceci de particulier qu'il rassemble des physiciens qui adoptent des interprétations assez variées : celle orthodoxe, celle des mondes multiples, celle en terme d'information, ainsi que des informaticiens. Ce domaine semble être exemplaire pour la réutilisation des travaux qui se fait sans trop de difficulté, entre des scientifiques travaillant avec des interprétations différentes.

3.2.2 Exemples dans le domaine des fondements de la théorie

Un autre domaine de recherche fournit également de très bons exemples : celui portant sur les fondements de la théorie quantique, notamment autour du théorème

[44] À ce sujet, voir les travaux de l'équipe de Gingras qui, à partir de bases de données de publications scientifiques, analysent les citations afin de reconstruire des réseaux de scientifiques avec leurs liens et influences.

de Bell. Je reprends ici des travaux présentés au chapitre précédent, section 3.2. Après le paradoxe d'incomplétude de la mécanique quantique présenté par EPR en 1935, Bohm et Aharonov (1957) reformulent l'argument au moyen d'une expérience plus facilement réalisable. En reprenant les interprétations que j'ai indiquées pour ces travaux, on peut écrire la relation de fécondation suivante :

$$\begin{aligned} &W_{\text{EPR 1935}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Bohm Aharonov 1957}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}) \end{aligned} \tag{5.11}$$

Vient ensuite le théorème de Bell (1964b), qui réutilise et critique l'article d'EPR, de sorte qu'on peut écrire la relation de fécondation :

$$\begin{aligned} &W_{\text{EPR 1935}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Bell 1964b}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}, I_{\text{ortho}}) \end{aligned} \tag{5.12}$$

Clauser, Horne, Shimony et Holt proposent ensuite une expérience pour tester les inégalités de Bell. Ils s'appuient en particulier sur les articles de Bell et de Bohm et Aharonov. On peut écrire les deux relations suivantes :

$$\begin{aligned} &W_{\text{EPR 1935}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho}} + I_{\text{réaliste locale}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{CHSH 1969}}(I_{\text{ortho min}} + I_{\text{Bohm}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho min}} + I_{\text{réaliste locale}}) \end{aligned} \tag{5.13}$$

et

$$\begin{aligned} &W_{\text{Bell 1964b}}(I_{\text{ortho}} + I_{\text{Bohm}}, I_{\text{ortho}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{CHSH 1969}}(I_{\text{ortho min}} + I_{\text{Bohm}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho min}} + I_{\text{réaliste locale}}) \end{aligned} \tag{5.14}$$

Aspect, Dalibard et Roger réalisent en 1982 une expérience testant ces inégalités, la première à pouvoir écarter l'échappatoire importante dite de la « communication ». On a notamment :

$$\begin{aligned} &W_{\text{CHSH 1969}}(I_{\text{ortho min}} + I_{\text{Bohm}} + I_{\text{réaliste locale}}, I_{\text{ortho min}} + I_{\text{réaliste locale}}) \\ &\xrightarrow{\mathcal{F}} W_{\text{Aspect et al. 1982}}(I_{\text{ortho}}, I_{\text{ortho}}). \end{aligned} \tag{5.15}$$

Ces exemples de relations de fécondation hétérogènes, qui mettent en jeu des interprétations très variées, sont symptomatiques du fait que le domaine des fondements de la mécanique quantique réunit des chercheurs qui partagent des interprétations très

diverses[45]. Il semble même que ce soit cette diversité des interprétations qui nourrisse directement ce domaine. Cela a lieu dans l'unité, puisque les travaux des uns peuvent être réutilisés par les autres, sans grande difficulté.

3.2.3 Les travaux en collaboration

Un dernier exemple concerne les travaux en collaboration. Au chapitre précédent, section 3.3, j'ai insisté sur l'existence de travaux en collaboration, notamment entre des scientifiques qui ne partagent pas la même interprétation. J'ai cité ceux de Deutsch et Jozsa (1992), de Griffiths et Niu (1996), de Fuchs *et al.* (1997) et des collaborations de Aharonov et Vaidman. Quand deux scientifiques collaborent pour un même travail, en travaillant chacun avec des interprétations différentes, on peut considérer qu'il s'agit d'un cas limite d'une réutilisation de travaux : les travaux réutilisés seraient simplement les différentes étapes temporelles du travail en collaboration. Une image simplifiée pourrait être la suivante : un scientifique rédige un premier brouillon, que l'autre scientifique reprend et poursuit, qui est repris et amélioré par le premier, etc. Cela permet de considérer un article écrit en collaboration comme le lieu d'une relation de fécondation entre les étapes de travail. Ainsi, les travaux en collaboration entre des scientifiques qui utilisent des interprétations différentes sont autant d'exemples de relations de fécondation hétérogènes, en faveur de l'existence d'une unité par la fécondation dans le domaine. Même lorsqu'ils ne publient pas un travail en collaboration, les scientifiques qui adoptent des interprétations différentes ont aussi de régulières discussions scientifiques. On le trouve indiqué à la fin de nombreux articles : Berthiaume et Brassard font état de discussions avec Deutsch, Jozsa et Simon ; Simon remercie notamment Brassard et Jozsa ; Shor a discuté avec Brassard et Simon. Ici encore, la diversité des interprétations qu'ils adoptent ne les empêche pas de travailler ensemble.

Ces constats rapprochent mon analyse de la situation de la mécanique quantique avec la seconde situation fictive qui avait été discutée dans la section 2.1, plutôt que de la première : les laboratoires et les collaborations scientifiques sont plus proches

[45]Le domaine des fondements de la théorie peut être considéré comme particulier dans la mesure où les questions d'interprétations s'y font plus pressantes qu'ailleurs. On pourrait alors objecter qu'il n'est pas représentatif des autres domaines, donc que les exemples présentés ne permettent pas d'inférer l'unité par la fécondation de la mécanique quantique en général. Cependant, ce qui me paraît justement intéressant est de voir que dans ce domaine fondamental où les interprétations quantiques ont une place de choix, la fécondation est encore possible et l'unité peut exister. L'objection peut être retournée : si les scientifiques qui travaillent dans un domaine où l'interprétation est primordiale arrivent à réutiliser leurs travaux sans difficulté, alors il est fort plausible que ceux qui travaillent dans d'autres domaines, où l'interprétation a une moindre importance, parviendront à le faire aussi.

de la mixité interprétative que du cloisonnement. Toutefois, une différence vis-à-vis de cette seconde situation réside dans le fait que très peu de scientifiques écrivent des articles avec l'interprétation qu'ils adoptent, préférant publier avec l'interprétation orthodoxe minimale. Ce dernier point n'affaiblit pas l'unité par la fécondation en mécanique quantique : ce qui importe, c'est que des scientifiques qui adoptent ou utilisent des interprétations variées puissent travailler avec des articles publiés avec une autre interprétation (fût-elle minimale) et que leurs travaux soient ensuite réutilisés comme tous les autres. Ces scientifiques se fondent ainsi sans problème dans le reste de la communauté et de sa production. L'unité en mécanique quantique porte plus particulièrement sur les (rares) scientifiques qui adoptent une interprétation non orthodoxe.

Conclusion de la section 3

Dans cette section 3, j'ai examiné si le concept d'unité par la fécondation pouvait s'appliquer au domaine de recherche de la mécanique quantique. J'ai tout d'abord donné des raisons expliquant pourquoi cela pouvait être possible. Puis j'ai présenté de nombreux exemples de relation de fécondation hétérogènes dans la section 3.2, dont j'ai indiqué qu'ils sont autant d'exemples en faveur de l'unité par la fécondation. Cela me permet de conclure que la mécanique quantique est effectivement unie par la fécondation, en dépit ou grâce à sa pluralité d'interprétations.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre a posé la question de déterminer si la mécanique quantique est un domaine de recherche uni, d'un point de vue pratique. Les doutes qu'on pouvait avoir sur son unité venaient principalement de l'existence d'une pluralité d'interprétations, surtout après que j'ai montré au chapitre précédent que cette pluralité d'interprétations existe dans la pratique scientifique. J'ai montré que deux concepts d'unité peuvent s'appliquer à la mécanique quantique. Le premier est dû à Kitcher, à travers l'existence d'une pratique scientifique consensuelle, acceptée par tous les membres de la communauté scientifique. J'ai montré qu'en mécanique quantique, il n'existe de pratique consensuelle qu'au sens d'une acceptation instrumentaliste et pragmatique. En l'occurence, il s'agit de la pratique issue de l'interprétation orthodoxe minimale. J'ai proposé ensuite un nouveau concept d'unité, qui repose sur l'existence de relations de fécondation (c'est-à-dire, de réutilisation) entre les travaux scientifiques. Dès

lors que les interprétations qui figurent dans la publication des travaux ne gênent pas leur réutilisation, le domaine peut être considéré comme uni vis-à-vis des interprétations. Un tel concept d'unité ne suppose pas l'existence d'un consensus, à la différence de celui de Kitcher. J'ai montré, à l'aide de nombreux exemples, que la mécanique quantique est effectivement unie au sens de la fécondation. Il est important de retenir que les deux concepts d'unité, consensuelle et par la fécondation, sont complémentaires l'un de l'autre. Ils mettent en évidence des traits différents de ce qu'est l'unité. Je propose que tous deux soient utilisés pour apprécier l'unité d'un domaine de recherche.

Troisième partie

La pluralité des interprétations : une approche normative par l'épistémologie sociale

Introduction

Cette troisième partie apporte un nouvel éclairage sur la pluralité des interprétations d'une théorie. Après la reconstruction formelle de la partie 1 et après la question de l'unité d'un point de vue pratique de la partie 2, j'aborde à présent un point de vue normatif sur la pluralité d'interprétations de la mécanique quantique. Je cherche à répondre aux questions telles que : cette pluralité d'interprétations est-elle bonne ? en quel sens et sous quelles conditions ?

Ces questions peuvent être abordées selon plusieurs approches. L'une d'elles considère des arguments liés à des positionnements métaphysiques. Par exemple, un réaliste peut juger que la pluralité d'interprétations est néfaste dans la mesure où elle n'est qu'une étape transitoire en vue du choix de la « vraie » interprétation. Selon une autre approche, on peut chercher à évaluer la pluralité des interprétations au regard des modifications, bénéfiques ou néfastes, qu'elle apporte dans la pratique de la recherche scientifique et son progrès.

C'est le choix que je fais dans cette partie : je me restreins à une approche qui prend en compte la pratique scientifique, m'inscrivant en cela dans la continuité de la partie 2. Plus spécifiquement, je propose d'aborder ces questions en étudiant la façon dont la communauté scientifique est organisée. Je considère la possibilité que la diversité d'interprétations puisse donner lieu à des approches scientifiques différentes et à des groupes de scientifiques distincts. Il s'agit de prendre en considération le fait que la recherche scientifique est une entreprise collective, pour voir dans quelle mesure un certain pluralisme peut lui être bénéfique. Le critère de jugement est alors le progrès épistémique de la discipline (je propose une caractéristique de cette notion de progrès dans les chapitres suivants). Autrement dit, je cherche à savoir si le fonctionnement de la recherche scientifique (par exemple son organisation sociale) est altéré ou au contraire tire bénéfice de l'existence de plusieurs interprétations quantiques. Ce faisant, j'adopte ce qu'on nomme le point de vue de l'épistémologie sociale, qui consiste à étudier les organisations sociales qui sont bénéfiques à l'acquisition de connaissances. Mon projet appartient à la partie de l'épistémologie sociale qui s'intéresse au domaine plus spécifique de la science. Le problème envisagé concerne le pluralisme scientifique, en le restreignant au cas de la pluralité des interprétations d'une théorie : il consiste à savoir si l'existence d'une pluralité d'interprétations dans la pratique scientifique peut être une gêne pour le fonctionnement de la recherche et le progrès épistémique de la communauté scientifique.

J'ai montré au chapitre 4 que les interprétations jouent des rôles en pratique

dans la recherche scientifique. La pluralité est alors apparue dans un aspect positif, puisque des scientifiques pouvaient s'aider de l'une ou l'autre de ces interprétations pour réaliser un nouveau travail. Mais l'existence de plusieurs interprétations au sein d'une communauté scientifique peut avoir des effets négatifs : compétitions inutiles entre les tenants d'interprétations différentes, incompréhensions, division des scientifiques, absence de communication. Les interprétations pourraient définir des « écoles » différentes, c'est-à-dire des groupes de scientifiques qui partagent une interprétation particulière. L'existence de ces écoles pourrait amener une division de la communauté scientifique. Je vais me concentrer sur cette possibilité de division : l'objectif de cette partie est d'évaluer les conditions sous lesquelles elle peut survenir et d'apprécier ses effets néfastes. Au contraire, si l'existence d'une pluralité d'écoles ne donne pas lieu à une division néfaste de la communauté, alors on pourra en conclure que la pluralité d'interprétations n'est pas mauvaise pour le progrès scientifique — du moins sur cet aspect-là. Il s'agira ainsi de tracer la limite d'un pluralisme acceptable, qui ne gêne pas la recherche scientifique.

Une autre façon de poser le problème est de repartir du constat que j'ai établi au chapitre 5. J'ai montré qu'il existe en mécanique quantique une unité par la fécondation : les interprétations mises en jeu dans la publication d'un travail ne sont pas un obstacle à ce que ce travail puisse être fécond pour un nouveau travail. Avec un point de vue normatif, la question se pose immédiatement de savoir si cette unité par la fécondation est bonne pour la mécanique quantique, ou si elle n'est pas suffisante pour un fonctionnement adéquat de la communauté scientifique. Autrement dit, s'il n'y avait pas seule interprétation quantique utilisée, la recherche en mécanique quantique progresserait-elle mieux que dans le cas présent, où une pluralité d'interprétations existent, reliées par une unité par la fécondation ? Il s'agit de savoir si l'unité par la fécondation est suffisante pour que le progrès de la recherche ne soit pas freiné.

Je vais aborder ce problème d'épistémologie sociale par le biais de la théorie des jeux. Je traiterai les agents scientifiques, ou les écoles interprétatives, comme des agents rationnels dotés de certaines préférences. Je serai amené à proposer un modèle formel. Afin d'étudier la pluralité des écoles interprétatives quantiques, je vais faire un détour dans un premier temps (au chapitre 6) par un cas limite, plus simple à appréhender et à présenter. J'étudie les stratégies de publication des scientifiques individuels. On quittera donc le domaine de la mécanique quantique et de la pluralité des interprétations. J'y établis un résultat général d'épistémologie social, à propos de scientifiques individuels. Dans un second temps (au chapitre 7) je réinterpréte ce modèle et ses conclusions, afin d'en faire un résultat pour toute division potentielle

d'une communauté scientifique en « écoles ». Je l'applique plus particulièrement au cas de la pluralité des interprétations quantiques, et je me prononce sur le caractère négatif ou non de la pluralité des interprétations.

Chapitre 6

Les scientifiques devraient-ils partager leurs découvertes intermédiaires ?

« Un Tiens vaut, ce dit-on, mieux que deux Tu l'auras :
L'un est sûr, l'autre ne l'est pas. »[1]

Introduction

Une partie de la littérature scientifique consiste en des résultats intermédiaires au sein d'un projet plus long. Les scientifiques publient souvent un premier résultat au cours de leur travail, tout en étant conscients qu'ils devraient bientôt parvenir à un résultat plus avancé à partir de ce résultat préliminaire. Considérons par exemple Schawlow et Townes durant l'été 1958 : ils venaient de concevoir ensemble le principe de fonctionnement de ce qui sera connu sous le nom de « laser » et ils avaient alors l'intention de construire le premier laser, en s'appuyant sur leurs plans. Devraient-ils publier maintenant leur idée du laser, ou plutôt profiter de leur avance sur de possibles concurrents et commencer le travail expérimental correspondant ? Ils choisirent de publier leur idée (théorique) du laser dans un journal scientifique et ils soumirent aussi une demande de brevet[2]. D'un côté, ce choix fut judicieux : le brevet fut accordé et leur article fut publié, ce qui les rendit rapidement célèbres. De plus, un autre scientifique du nom de Gould allait soumettre une demande de brevet similaire quelques mois plus tard, en mars 1959 ; elle fut refusée, en raison de la priorité de Schawlow et Townes. Si ces derniers n'avaient pas soumis leur idée en 1958, le brevet aurait certainement été attribué à Gould. En ce sens, publier leur résultat intermédiaire fut une stratégie

[1] Jean de la Fontaine (1668), « Le Petit Poisson et le Pêcheur », *Fables*, livre 5, fable 3.
[2] Le matériau historique de cet exemple est tiré de Bromberg (1991).

payante pour Schawlow et Townes. D'un autre côté, l'histoire a montré que leur publication eut aussi des inconvénients pour eux. Elle déclencha une course parmi de nombreux laboratoires américains en vue de la première réalisation expérimentale du laser. En plus de leur apporter des concurrents, leur publication aida ces concurrents de façon déterminante. Tant et si bien que ce fut un autre scientifique, Maiman, et non pas Schawlow et Townes, qui parvint à construire le premier laser opérationnel, en mai 1960, et publia son succès. Si Schawlow et Townes n'avaient pas publié leur idée théorique, il est probable qu'ils auraient été les premiers à construire un laser. Le fait qu'ils aient publié la première étape théorique les empêcha certainement de rester en tête pour la seconde étape expérimentale.

Est-ce que la décision de Schawlow et Townes de publier leur idée théorique était la meilleure ? Ou, plus généralement, est-ce que la décision de publier n'importe quel résultat intermédiaire est un choix optimal ? Pour ce qui est de la communauté scientifique dans son ensemble, il semble que ce soit le cas, puisque cela permet un progrès plus rapide, en faisant connaître les résultats plus tôt. Mais pour Schawlow et Townes cela n'est pas facile à trancher et les arguments ci-dessus semblent conduire à des conclusions opposées. De façon générale, de quel côté la balance penche-t-elle ? C'est-à-dire, un scientifique devrait-il suivre le proverbe « un Tiens vaut mieux que deux Tu l'auras » et publier tous les résultats intermédiaires qu'il obtient ? C'est la question que je pose dans ce chapitre. Elle appartient au domaine de l'épistémologie sociale des sciences, qui étudie la dimension collective de la connaissance (ici : à travers la question de la publication). C'est une question normative, qui requiert d'évaluer les différents arguments possibles. Je ne m'intéresserai pas ici à la question descriptive de savoir si les scientifiques publient effectivement leurs résultats intermédiaires — même s'il me semble que les scientifiques ont davantage tendance à publier leurs résultats intermédiaires, les exemples que je propose ne sont donnés qu'à titre d'illustration. Le raisonnement qui a été esquissé au-dessus et qui sera développé dans la section 2, semble être implicitement un argument économique informel. Mon but dans ce chapitre sera de clarifier, de raffiner et d'évaluer un tel argument informel. Pour cela, je l'étudierai dans le cadre de la théorie rationnelle de la décision, en supposant des utilités ou des préférences. Je serai amener à proposer un modèle formel de théorie des jeux (section 3).

La question de l'opportunité des publications intermédiaires permet de retrouver certains problèmes classiques de l'épistémologie sociale. Par exemple, un scientifique pourrait avoir intérêt à ne pas publier ses résultats intermédiaires afin de publier davantage de travaux scientifiques ensuite, tandis que la communauté pourrait pré-

férer qu'elle publie, dans l'intérêt du progrès de la connaissance commune. Cela est connu comme le « désaccord entre les exigences de la rationalité individuelle et celles de la rationalité collective (ou de la communauté) »[3]. Un autre problème est de savoir dans quelle mesure des motivations non-épistémiques pourraient détourner un scientifique de sa meilleure stratégie (épistémique). Par exemple, il se pourrait qu'il obtienne un meilleur poste académique s'il publiait plusieurs articles au lieu d'un seul article plus volumineux, même si cette façon de faire n'apporte aucune connaissance scientifique supplémentaire. On peut considérer qu'il s'agit d'un désaccord entre les exigences épistémiques et non-épistémiques. Ces deux désaccords possibles peuvent être étudiés en considérant différentes préférences dans le cadre de la décision rationnelle : individuelles ou collectives, épistémiques ou non-épistémiques. Le modèle que je vais proposer se concentre sur le premier désaccord, entre les aspects individuels et collectifs.

Le chapitre est organisé de la façon suivante. Dans la section 1, je définis ce qu'est un résultat intermédiaire et je l'illustre avec des exemples tirés de la physique. Dans la section 2, je passe en revue diverses explications possibles, qui vont en faveur ou en défaveur de la décision de publier. Je me concentre ensuite dans la section 3 sur ce que je considère être les paramètres les plus pertinents et je propose un modèle de la théorie des jeux pour les formaliser. Afin d'étudier de quel côté penche la balance, j'utilise ce modèle pour identifier les conditions sous lesquelles un scientifique devrait ou ne devrait pas publier un résultat intermédiaire (section 4).

1 Définition et exemples de résultats intermédiaires

Je définis un *résultat* (ou un *travail*) comme un élément de connaissance produit par les scientifiques, dont la taille est suffisamment grande pour être accepté pour une publication, selon les critères courants. Un résultat est ainsi publiable, sans être nécessairement publié. En demandant qu'il puisse être accepté pour une publication, je souhaite simplement écarter les résultats trop petits (le premier calcul réussi, ou la première donnée expérimentale), afin de les considérer seulement à la taille de ce qui existe dans les journaux scientifiques standard. Je n'essaierai pas de fournir une description plus fine de la façon dont un résultat est obtenu. La taille minimale d'un résultat sera prise comme une notion primitive, due aux critères actuels de la

[3] Kitcher (1990), p. 6.

discipline[4]. Dans la section 4.5, je reviendrai sur cette hypothèse et je ferai quelques commentaires sur la taille minimale d'une publication.

La définition d'un résultat intermédiaire va s'appuyer sur la relation de fécondation que j'ai définie au chapitre 5, section 2.2. Un ancien travail est dit fécond pour un nouveau travail si la réutilisation de l'ancien travail a facilité, pour le scientifique, la réalisation du nouveau travail. Indiquons dès à présent que le fait de reprendre cette même notion de fécondation me permettra de faire le lien, au chapitre suivant, avec la notion d'unité par la fécondation que j'ai défendue au chapitre 5, section 2.3. Je pourrai me servir des résultats du modèle pour porter un regard critique sur cette notion d'unité par la fécondation. La relation de fécondation entre des travaux permet d'analyser le travail de recherche qui est mené en vue d'un but particulier. On peut mettre en évidence une chaîne de résultats W_i qui sont successivement féconds, avec le dernier résultat de la chaîne qui correspond au but recherché (où les W_i sont ordonnés temporellement selon l'indice i). Ma définition d'un résultat *intermédiaire* a pour but de saisir ce que ce terme signifie généralement, tout en posant plus clairement la question de sa publication. Un résultat intermédiaire est un genre particulier de résultat fécond : je définis un résultat W_i comme *intermédiaire* pour un autre résultat W_{i+1} si :

- (i) au moment où le scientifique atteint W_i, il a l'intention d'atteindre W_{i+1} ;
- (ii) au moment où il atteint W_i, il s'attend à ce que W_i soit fortement fécond pour W_{i+1} ;
- (iii) W_i se trouve être fortement fécond pour W_{i+1}.

La condition (i) signifie que le scientifique qui obtient W_i ne considère pas avoir atteint son but scientifique : il n'arrêtera pas sa recherche ici (ni ne commencera un nouveau projet), mais commencera à rechercher en vue de W_{i+1} ou plus. Il se peut que le scientifique ait eu W_{i+1} pour but dès le début, mais cela n'est pas nécessaire ; il suffit qu'il l'ait au moment où il atteint W_i. (ii) requiert qu'il sache que le résultat qu'il a obtenu s'avérera très utile dans sa recherche future. (iii) a pour but d'exclure

[4]Il semble que la taille des publications ait changé au fil des décennies et une étude détaillée de ses variations pourrait être intéressante (au moins, cela suggère que la taille des résultats *publiables* a varié elle aussi). Avant la création des journaux scientifiques au XVIIe siècle et le rôle reconnu qu'ils ont acquis au XVIIIe siècle, l'unité de publication était le livre. De nos jours, les journaux publient des articles de taille variable. Par exemple, la *Physical Review* publie des articles de taille standard, ainsi que des « Communications Rapides », des « Brefs Rapports » et des « Commentaires ». D'autres journaux sont spécialisés dans des articles courts, par exemple les *Physical Review Letters*.

les cas où le scientifique se trompe sur la fécondation possible d'un résultat (je ne considérerai pas ces cas, par simplicité). (iii) exige aussi que l'évolution soit telle que W_i soit plus tard utilisé par un scientifique pour atteindre W_{i+1} (le W_{i+1} aurait pu être atteint à partir d'un autre chemin de recherche). On remarque que le concept de résultat intermédiaire dépend de ce que le scientifique sait et de ce à quoi il s'attend au moment où il atteint un résultat. Cela est voulu, puisqu'on s'intéresse à la stratégie de publication que le scientifique va adopter lorsqu'il atteint un résultat. Un résultat intermédiaire est un genre particulier de résultat fécond, que le scientifique espère être fécond au moment où il l'atteint. Les conditions (i) et (ii) ont ainsi pour but de restreindre la question de la publication des résultats intermédiaires à certains des résultats féconds.

Afin d'aider à clarifier la définition ci-dessus, je commence avec un exemple de résultat qui n'est justement pas intermédiaire. Considérons d'une part la relativité restreinte d'Einstein de 1905, qui est une théorie de l'espace-temps, et d'autre part sa relativité générale de 1915, qui peut être considérée comme une extension de la première à la théorie de la gravitation. Est-ce que la relativité restreinte est un résultat intermédiaire pour la relativité générale ? Elle n'en est pas un, car les conditions ci-dessus (i) et (ii) ne sont pas remplies. En 1905, Einstein pensait qu'il avait atteint un résultat satisfaisant et final en tant que tel ; il n'avait pas idée d'une théorie de la relativité qui puisse être plus générale et sa théorie de la relativité de 1905 n'était pas appelée « restreinte » à ce moment. C'est seulement plus tard, en 1907, qu'il s'aperçut que la gravité devait être incluse de façon particulière et qu'une nouvelle théorie était en fait nécessaire[5]. Par conséquent, on ne peut pas considérer qu'Einstein avait en 1905 le but d'une théorie relativiste de la gravitation, puisqu'il ne lui est apparu qu'en 1907 ; (i) n'est pas satisfait et (ii) non plus. Ce contre-exemple est typique de nombreux résultats, lorsque les scientifiques n'ont pas d'idée particulière de ce pour quoi leurs résultats pourraient être féconds. À cause de la condition (i), de tels résultats ne peuvent être considérés comme intermédiaires. Il se peut qu'ils soient tout de même réutilisés plus tard par le même scientifique, ou par d'autres (on peut alors parler de résultats rétrospectivement féconds, mais ce chapitre ne s'intéresse pas à la publication de tels résultats).

Je donne à présent des exemples de résultats intermédiaires. En 1900, Planck travaillait sur le problème dit du corps noir : le but était de rendre compte de façon

[5]Pour cet exemple, je m'appuie sur Pais (1982). Il écrit : « C'est ici [dans un article de revue de 1907] qu'il commence le long voyage depuis la théorie restreinte vers la théorie générale de la relativité. » (Pais, 1982, p. 178).

théorique du spectre d'énergie pour un genre particulier de corps thermique. À cette époque, il y avait des problèmes de cohérence à la fois d'un point de vue théorique interne et aussi dans l'accord expérimental. Les derniers résultats de Planck furent publiés en deux étapes : tout d'abord, il obtint « une nouvelle loi de distribution qu'il présenta à une conférence de la Société de Physique Allemande le 19 octobre 1900 »[6]. Cette loi rendait compte des derniers résultats expérimentaux et prédit aussi d'autres résultats qui furent bientôt obtenus, bien mieux que toutes les autres propositions. Dans un second temps, Planck parvint à fournir une dérivation théorique (ou plutôt, deux) pour sa loi de distribution et il présenta ce résultat à la Société de Physique Allemande le 14 décembre 1900, pour le soumettre en janvier 1901 au journal *Annalen der Physik*. Le premier résultat d'octobre est bel et bien intermédiaire pour le second de décembre au sens de ma définition. Pour ce qui est de la condition (i), le but de Planck était clairement d'obtenir le second résultat lorsqu'il obtint le premier. Il se souvient que

> « Le jour même où je formulai cette [nouvelle] loi, je me dévouais à la tâche d'en chercher un vrai sens physique. »[7]

La recherche du « vrai sens physique » ne signifie rien d'autre que d'en chercher une dérivation théorique. Pour ce qui est de (ii) et (iii), il est clair que Planck savait que sa loi de distribution serait une aide incomparable pour deviner une dérivation théorique et cela s'avéra être le cas.

Enfin, un exemple historique d'une chaîne de résultats intermédiaires est la série des articles d'Aspect en mécanique quantique autour de 1980. Ils sont en général présentés comme menant à la célèbre expérience d'Aspect *et al* (1982), qui est une réalisation de l'expérience de pensée d'EPR ; elle permet de répondre à des questions cruciales quant à l'intrication et la localité en mécanique quantique. Les résultats expérimentaux sont présentés à travers plusieurs articles : tout d'abord dans une configuration de base, puis quelques mois plus tard avec des raffinements progressifs (avec un polariseur à deux voies et avec des analyseurs qui dépendent du temps)[8]. Les articles successifs peuvent être considérés comme une chaîne de résultats intermédiaires. La condition essentielle (i) est clairement satisfaite : les détails de l'expérience finale avaient été présentés et discutés de façon théorique dans un article préliminaire (Aspect, 1976).

[6]Kragh (2000). Planck avait proposé d'autres résultats auparavant ; je ne les mentionne pas par simplicité.

[7]Kuhn (1978), p. 97-98.

[8]Respectivement, Aspect, Grangier et Roger (1981, 1982) et Aspect, Dalibard et Roger (1982).

2 Quelques explications possibles

Supposons qu'un scientifique ait atteint un résultat intermédiaire : devrait-il le publier maintenant ou attendre d'avoir atteint le résultat final ? Dans l'introduction de ce chapitre, j'ai indiqué des arguments en faveur des deux stratégies. Dans cette section, je présente une revue plus complète des arguments possibles. Dans les sections suivantes, je me concentre sur certains des arguments les plus importants et je propose un modèle formel permettant de décider entre eux.

Tout d'abord, considérons les raisons pour lesquelles un scientifique devrait publier un résultat intermédiaire au moment où il l'obtient et non pas, par exemple, au moment où il obtient le résultat final. Une explication habituelle est qu'il existe une pression qui pousse les scientifiques à avoir un grand nombre de publications (la règle implicite du « publier ou mourir »). Par conséquent, ils pourraient essayer de publier tout ce qui est possible, sans attendre le résultat final. Plusieurs petits articles sont meilleurs qu'un seul article plus gros, lorsque la production est évaluée en fonction du nombre d'articles publiés. Les scientifiques pourraient aussi vouloir éviter d'être dépassés par des concurrents : ils pourraient être encouragés à publier même les plus petits résultats obtenus, parce que la publication est le seul critère pour décider qui est celui qui a découvert le résultat et parce que seul le premier qui le fait est récompensé (sur le plan académique, cela est connu comme la « règle de priorité »)[9].Il pourrait être trop risqué d'attendre un résultat plus grand et il pourrait être plus sûr de valider chaque étape atteinte.

Les récompenses personnelles pour les scientifiques sont les prix, l'autorité, l'estime de leurs collègues, etc. Les considérations de temps peuvent entrer en compte de façon plus basique : l'intérêt du scientifique ne réside pas nécessairement dans le long terme, par exemple s'il souhaite candidater bientôt à un nouveau poste. Il existe aussi des raisons purement épistémiques qui encouragent à publier un premier résultat intermédiaire : un scientifique peut s'attendre à des retours intéressants sur son travail. C'est-à-dire que ses collègues peuvent lui montrer qu'il adopte une hypothèse peu crédible et lui économiser du temps ; à l'inverse, une publication prometteuse peut attirer d'autres scientifiques dans le domaine et leurs travaux ultérieurs peuvent l'aider dans son propre travail de recherche.

Mais il y a aussi des inconvénients au fait de publier des résultats intermédiaires. Le plus évident est que, lorsqu'un scientifique écrit un article, il fournit de nombreux

[9] « Ce fut le sociologue Robert Merton qui établi la règle de priorité comme une caractéristique de l'organisation sociale de la science digne d'être étudiée. », selon Strevens (2003), p. 57, lequel propose une explication du rôle de ce schéma de récompense.

détails sur sa découverte, qui pourront être utilisés par ses concurrents pour les étapes suivantes de la recherche. En effet, les articles ne sont en général pas acceptés sans un minimum de détails sur la façon dont le résultat a été obtenu : un scientifique qui publie une première étape est obligé de dévoiler et de perdre une partie substantielle de son avance, ainsi que de sacrifier ses chances futures pour une récompense immédiate. De plus, il se pourrait qu'un scientifique qui publie une étape libère un concurrent d'un problème que ce dernier n'aurait jamais pu résoudre (par exemple à cause de ses capacités particulières) ; il lui permet alors de continuer la compétition, tandis qu'en ne publiant pas il l'aurait laissé bloqué et aurait éliminé un concurrent. En publiant un nouveau résultat, un scientifique pourrait attirer de nouveaux collègues dans le domaine, qui sont de nouveaux concurrents potentiels pour sa recherche future et cela pourrait diminuer ses chances de réussir le premier[10]. Une autre raison de ne pas publier un résultat intermédiaire est qu'il pourrait être faux. Peut-être le scientifique se serait-il rendu compte tout seul de son erreur dans la suite de la recherche et aurait-il évité de détruire sa réputation en publiant un résultat faux[11].

Comme il a été indiqué plus haut, la raison la plus importante pour ne pas publier un résultat intermédiaire pourrait être que le scientifique aiderait ses concurrents et leur offrirait des détails techniques qui pourraient les aider dans le reste de la recherche. Cependant, les scientifiques en sont conscients et parviennent souvent à publier astucieusement d'une façon qui leur soit avantageuse, plus particulièrement dans la science expérimentale. Toute la connaissance nécessaire à la reproduction du résultat n'a pas besoin d'être indiquée dans l'article et révélée aux concurrents. Seule une petite partie est requise pour que la découverte soit considérée comme nouvelle et authentique. Par exemple, les physiciens expérimentalistes peuvent essayer de ne pas révéler tout le détail de leurs protocoles, afin qu'ils puissent continuer à être les seuls avec leur technique dans un futur proche (ainsi, une partie de la connaissance expérimentale n'est pas susceptible de faire l'objet d'une publication et reste au sein d'un laboratoire donné). C'est ce qu'exprime le témoignage d'un physicien recueilli par Collins à propos de la façon dont un article doit être rédigé :

> « Ce que vous publiez dans un article est toujours suffisant pour montrer que vous l'avez fait, mais jamais suffisant pour permettre à quelqu'un d'autre de le

[10] Par exemple, pendant la course pour le laser qui a été présentée dans l'introduction de ce chapitre, Maiman « avait juste publié [un résultat à propos de l'efficacité du rubis] et il appréhendait que cela puisse mettre d'autres sur la piste du laser au rubis rose. » (Bromberg, 1991, p. 91).

[11] Pour une étude de l'effet de la propagation de résultats aléatoirement faux, cf. par exemple Zollman (2007, 2010).

faire. »[12].

Une telle technique de publication semble encourager les gens à publier, puisqu'ils peuvent presque avoir le beurre (avoir la récompense pour avoir publié) et l'argent du beurre (ne rien donner à leurs concurrents).

3 Un modèle de recherche séquentiel

3.1 Un modèle formel, en épistémologie sociale

Dans les explications de la section précédente à propos de la meilleure stratégie de publication, on trouve des arguments opposés, de sorte qu'aucune stratégie ne semble s'imposer de façon évidente en générale. Je vois au moins deux méthodes pour aborder ce problème et répondre à la question normative de la meilleure stratégie de publication. Une première possibilité est de raffiner la description de la situation particulière dans laquelle se trouve le scientifique, afin de le conseiller de façon plus précise. On effectue alors des études de cas historiques détaillées et on analyse plus précisément l'état de la recherche, les équipes compétitives, la difficulté des étapes, etc. Au lieu de s'intéresser aux conditions particulières, une seconde possibilité est d'étudier des tendances générales. On raisonne avec une situation idéalisée, où seuls quelques-uns des arguments présentés plus haut jouent un rôle. Autrement dit, on propose un modèle général et on l'utilise pour trancher entre les différents compromis. En enrichissant un modèle initial assez simple, il est possible de décrire plus fidèlement une situation réelle. Dans la suite de ce chapitre, j'adopte la seconde méthode : je vais proposer de modéliser de façon formelle une partie des arguments de la section 2.

La plupart de ces arguments mettent en jeu un raisonnement informel, comme le fait de peser le gain tiré d'une publication, contre le risque qu'un concurrent ne la réutilise trop rapidement. Le modèle à venir a pour but de modéliser de tels raisonnements, en définissant certaines préférences, certaines probabilités d'échec ou de succès, etc., de sorte qu'un traitement quantitatif soit possible. Je vais adopter le cadre de la théorie rationnelle de la décision et de la théorie des jeux. Je ne vais pas forcer un modèle économique préexistant ou une théorie à s'appliquer à la situation des résultations intermédiaires, mais je vais essayer d'identifier à partir du bas, pour

[12] Collins (1974), p. 176. Cet article s'appuie d'ailleurs sur une étude de cas de physiciens cherchant à construire un laser particulier, le TEA laser, autour de 1970. Je dois cette référence bibliographique à Michael Strevens.

ainsi dire, les éléments pertinents[13]. En formalisant certains arguments, un espoir modeste est que cela aidera à les clarifier et donnera un cadre dans lequel les discuter.

Une telle approche de modélisation s'est développée ces dernières années, au sein du champ dit de l'« épistémologie sociale de la science ». Son problème est d'« identifier les propriétés des systèmes sociaux qui sont bien conçus d'un point de vue épistémique »[14]. Des modèles formels ont été proposés pour des questions variées[15], mais la question des résultats intermédiaires n'a jamais été abordée jusqu'à présent.

Le premier but du modèle sera d'identifier les conditions sous lesquelles un scientifique devrait ou ne devrait pas publier un résultat intermédiaire. Le second but est de retrouver des questions traditionnelles d'épistémologie sociale de la science (auxquelles j'ai fait allusion dans l'introduction) : le désaccord possible entre ce que les individus et la communauté pensent être la meilleure stratégie et le désaccord possible entre les motifs épistémiques et non-épistémiques. Cela sera développé plus bas.

3.2 Présentation du modèle

3.2.1 Aperçu du modèle

La situation idéalisée que je considère est grossièrement la suivante : deux scientifiques sont en compétition sur un programme de recherche, qui est composé de plusieurs résultats intermédiaires qui doivent être atteints dans l'ordre. Les scientifiques entreprennent toujours des recherches pour le prochain résultat intermédiaire et ils ont une certaine probabilité par unité de temps de réussir. Lorsqu'un scientifique, par exemple A, atteint un résultat intermédiaire, il peut ou bien le publier, ou bien continuer sa recherche. Après qu'un résultat a été publié, le concurrent B peut partir de lui pour continuer sa propre recherche. Ainsi, lorsque A publie, il perd son avance et B est en mesure d'être en compétition directe avec lui pour l'étape suivante. Mais A est aussi reconnu comme le premier scientifique à avoir atteint cette étape. Des stratégies peuvent être comparées en calculant des probabilités d'atteindre telle ou telle étape. Je passe maintenant à la présentation détaillée du modèle.

[13]Mes tentatives de réutiliser et de transposer des articles d'économie à propos de brevets (tels que Bessen et Maskin, 2006) à la situation des publications intermédiaires n'a pas été fructueuse.

[14]Kitcher (1993), p. 303.

[15]Cf. par exemple Kitcher (1990, 1993), Goldman (2009), Mirowski et Sklivas (1991), Strevens (2003a, 2003b, 2006), Weisberg et Muldoon (à venir), Zollman (2007, 2008, 2009, 2010).

3.2.2 Une chaîne d'étapes

Le modèle suppose que le domaine de recherche consiste en un unique projet de recherche, qui est une chaîne de résultats successivement intermédiaires. Dans ce modèle, les « résultats » sont appelés de façon synonyme des « étapes » sur la chaîne, numérotés 0, 1, 2... (figure 6.1).

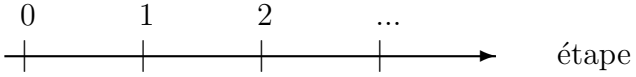

FIGURE 6.1 – La chaîne d'étapes intermédiaires qui compose le domaine de recherche.

Je considère que les travaux de recherche dans le domaine peuvent se terminer de deux façons différentes (ce qui correspond à deux fins du jeu possibles). Ou bien il existe une dernière étape l sur la chaîne, qui est le but final de la recherche (cette hypothèse est appelée la « chaîne finie »). Ou bien il n'y en a pas et la chaîne est infinie, mais c'est le temps qui est limité (c'est l'hypothèse de « temps fini »). Le temps est discrétisé en intervalles de temps et chaque intervalle de temps comprend deux actions possibles : une concernant la recherche, l'autre concernant la publication (cf. les règles pour chacune plus bas). Dans le cas de la chaîne finie, la limite du jeu porte sur le nombre l des étapes ; dans le cas du temps fini, la limite porte sur le nombre n d'intervalles temporels. Ces hypothèses modélisent des situations différentes : la chaîne finie correspond à un but scientifique particulier, tandis que le temps fini peut correspondre à une compétition pour du crédit scientifique avant une date limite, comme le fait de candidater à un nouveau poste, ou de rédiger une thèse. Si un scientifique se donne pour but un résultat pour lequel il n'a pas d'idée claire de ce pour quoi il pourrait être fécond, il le considérera comme étant un but final et ce sera la dernière étape d'une chaîne finie. Je suppose que les scientifiques savent dans quelle situation ils se trouvent.

À part pour la dernière étape, les étapes sont intermédiaires : chacune est fortement féconde pour la suivant sur la chaîne. Par simplicité, je fais l'hypothèse qu'il n'y a pas d'autre moyen de parvenir à l'étape k que de passer par $k-1$ et les étapes doivent être passées dans l'ordre. Avec cette hypothèse, la recherche peut être qualifiée de « séquentielle ». Un scientifique ne peut entreprendre une recherche pour l'étape k que si l'étape $k-1$ est disponible pour elle et il y a deux façons qu'elle le soit : ou bien parce qu'elle l'a atteinte plus tôt grâce à sa propre recherche, ou bien parce que quelqu'un d'autre a publié l'étape (une étape publiée peut être considérée comme étant passée par n'importe qui).

3.2.3 Deux scientifiques compétitifs

Le nombre de scientifiques est fixé à deux, appelés A et B. Comme le nombre de concurrents est fixé, le modèle ne permettra pas d'étudier si une publication attire de nouveaux scientifiques dans le domaine, ou si les scientifiques quittent le domaine dans le cas où il y a trop peu de progrès. Ces deux scientifiques sont les agents pour le jeu considéré : ils peuvent être aussi considérés comme une équipe de scientifiques, ou des laboratoires, pourvu que leurs membres se comportent de façon identique dans leurs décisions. Les scientifiques partent de l'étape 0. À chaque moment, ils ont une position définie sur la chaîne, correspondant aux étapes qu'ils ont atteintes. Il y a deux façons pour un scientifique de se déplacer sur la chaîne : ou bien sa recherche lui apporte un succès (cf. les règles ci-dessous) et cela lui permet de se déplacer d'une étape, ou bien un autre scientifique publie une étape qu'il n'avait pas encore atteinte.

3.2.4 Activité de recherche

À chaque intervalle de temps, un scientifique entreprend des recherches, afin de passer à l'étape suivante (l'étape $k+1$ s'il est à l'étape k). Il mène tout le temps cette recherche, car on le suppose libéré de tout enseignement ou charge administrative. Il n'y a pas de coût associé à cette recherche. Sa stratégie ne porte pas sur la fait d'entreprendre des recherches, mais seulement sur la décision de publier une étape qu'il passe. Durant un intervalle temporel, il y a la probabilité p que sa recherche soit couronnée de succès et qu'il puisse avancer d'une étape. On suppose que p est le même pour tous les scientifiques et constant au cours du temps. Si ce paramètre global est petit, cela signifie que les étapes sont difficiles à passer et s'il est proche de 1, qu'elles sont faciles.

3.2.5 Publication

À la fin de chaque intervalle temporel, un scientifique a la possibilité de publier. Il peut décider de publier de façon tout à fait libre : seulement l'étape qu'il vient de passer, ou ses deux dernières étapes ensemble ; il peut publier une étape passée auparavant même si sa recherche présente n'a pas aboutie. Les seules restrictions sont qu'il n'est pas possible de publier quelque chose qui a déjà été publié et que les étapes doivent être publiées dans l'ordre croissant (par exemple, pour publier l'étape k on doit aussi publier les étapes précédentes $k-1$, $k-2$, etc., si nécessaire). Un scientifique n'est pas engagé à suivre une règle quelconque pour la publication : sa stratégie est parfaitement libre. Pour un scientifique, la conséquence du fait qu'un

concurrent publie est qu'il est avancé sur la chaîne des étapes, s'il n'avait pas encore atteint l'étape. Il est important de noter qu'un scientifique ne sait jamais exactement où est son concurrent : une étape publiée indique seulement l'étape minimum que celui-ci a passée. Noter aussi que dans ce modèle, un scientifique ne garde rien par-devers lui en plus de ce qu'il publie, pour une étape donnée (comme le détail d'un protocole expérimental ou d'un calcul). La publication d'une étape permet à son concurrent de le rattraper à tout point de vue (par exemple, le savoir-faire est négligé), de telle façon que les deux scientifiques ont toujours la même probabilité de passer l'étape suivante. Avoir passé une étape précédente ne donne aucun avantage d'aucune sorte. Un mot sur cette importante idéalisation. Comme elle exagère assez fortement les effets désavantageux lié au fait de publier un résultat, elle est plutôt défavorable envers la stratégie qui consisterait à publier tous les résultats intermédiaires. Lorsque je montrerai dans les sections 4.2 et 4.3 que la stratégie qui consiste à publier est la meilleure, il ne faudrait pas en imputer la raison à des hypothèses trop favorables du modèle, bien au contraire. Enfin, je suppose que lorsqu'un scientifique décide de publier, le journal accepte sa soumission (notamment parce qu'il a effectivement passé l'étape).

3.2.6 Valeur v de la récompense

Je vais tout d'abord expliquer les règles d'attribution des récompenses, puis discuter de ses deux interprétations possibles, épistémique ou non. Un scientifique obtient une récompense si et seulement s'il publie une étape. Chaque étape publiée a une valeur v, qui est donnée au premier scientifique qui publie, à cause de la règle de priorité. Au cas où les deux scientifiques publient la même étape au même moment (c'est-à-dire pour le même intervalle de temps du modèle), chacun reçoit $v/2$. Il y a deux façons de le justifier : tout d'abord, on peut supposer que l'un des deux scientifiques est en réalité le plus rapide à écrire au journal et obtient la totalité de la récompense avec une probabilité $1/2$. On peut supposer aussi que la simultanéité doit être interprétée strictement, et que les deux sont reconnus comme ayant découvert le résultat indépendamment, de sorte que chacun reçoit la moitié de la récompense (par exemple, la moitié de l'argent pour un prix Nobel divisé entre les lauréats).

La récompense v peut recevoir deux interprétations. La première est épistémique : la récompense correspond directement au progrès que le scientifique a apporté à la connaissance dans la société. La condition pour la récompense est seulement que le scientifique fasse connaître son progrès de manière publique, dans un journal, de sorte

qu'il devienne accessible à chacun. Si le scientifique se soucie de sa récompense, il a un but épistémique mais égoïste : il se soucie du progrès épistémique, mais seulement à travers sa propre contribution. La seconde interprétation de v est non-épistémique : il s'agit de célébrité, d'autorité, d'argent, de prix, etc. Lorsqu'un scientifique publie un résultat, il devient davantage connu et sa réputation augmente d'une certaine somme v. Ici, je suppose par simplicité que la valeur non-épistémique de la récompense correspond à sa valeur épistémique. Ainsi, qu'un scientifique se soucie de la récompense épistémique ou non-épistémique est équivalent et le modèle n'étudiera pas un possible désaccord entre les deux cas de figure. Je parlerai seulement de la stratégie « individuelle », qu'elle soit épistémique ou non ; elle sera comparée à la stratégie qui serait la meilleure pour la société et qui est seulement épistémique.

3.2.7 Fin du jeu

Au fil des intervalles temporels, les scientifiques accumulent des récompenses. Ce qui importera sera le total de leurs récompenses à la fin du jeu. Dans l'hypothèse de temps fini, le jeu est fini lorsque le dernier intervalle de temps n est atteint. Dans le cas d'hypothèse de la chaîne finie, il est fini lorsqu'un scientifique atteint la dernière étape l. À ce moment, chaque scientifique additionne les récompenses qu'il a obtenues, et je suppose que son but est d'obtenir le maximum de récompense à ce moment (et non, par exemple, d'avoir seulement plus de récompenses que son concurrent). Le modèle suppose que les résultats de la recherche s'obtiennent avec certaines probabilités : je fais l'hypothèse qu'un scientifique souhaite maximiser sa récompense *moyenne* (en d'autres termes, je suppose qu'un scientifique est neutre vis-à-vis du risque[16] ; je reviendrai sur le rôle de cette hypothèse dans diverses situations à la section 4). Je suppose aussi que les scientifiques sont rationnels et qu'ils choisiront leur stratégie de publication en accord avec ce but final. Je fais également l'hypothèse que chaque scientifique suppose que son concurrent est rationnel. La fin du jeu est le seul moment de comparaison entre les deux scientifiques : si n ou l varie, le modèle permet d'étudier des stratégies de long terme (n ou l grand) et de court terme (n ou l petit).

Notons que l'hypothèse selon laquelle les scientifiques sont intéressés dans la somme de v n'est pas particulièrement favorable envers la stratégie qui consiste à publier. Elle ne fait pas de différence entre un scientifique qui publie trois étapes en

[16] Un agent *neutre vis-à-vis du risque* n'a pas de préférence si on lui présente l'alternative suivante : ou bien recevoir v avec certitude, ou bien recevoir $2v$ ou 0, chacun avec une probabilité $0,5$. Un agent *averse au risque* préfère le premier scénario, un agent *enclin au risque* préfère le second.

une fois, ou qui publie les trois étapes une par une. Par exemple, compter le nombre de publications serait davantage favorable envers la dernière option et de manière générale envers la stratégie qui consiste à publier.

4 Résultats du modèle

4.1 Ce que la société veut

L'intérêt de la société est considéré comme étant seulement épistémique. Dans l'hypothèse de temps fini, il consiste à ce que la plus haute étape possible soit publiée, à la fin du temps autorisé. Dans l'hypothèse de chaîne finie, la plus haute étape publiée est toujours la même à la fin du jeu, donc il est naturel de considérer que l'intérêt de la société réside dans le fait que cette dernière étape soit atteinte en un temps le plus court. Quelle stratégie de publication la société préfère-t-elle que les scientifiques adoptent ? Supposons que le scientifique A ne publie pas une étape qu'il vient de passer, étape que le scientifique B n'a pas encore passée. Alors, dans l'intervalle de temps suivant, B va entreprendre une recherche en vue d'une étape qui est inutile du point de vue de la société, puisqu'elle a déjà été passée par A : c'est une force de travail gaspillée. La société préfère donc que les scientifiques publient immédiatement les étapes qu'ils franchissent. Dans notre exemple, cela permet au scientifique B, comme à A, de consacrer sa force de recherche à une étape qui n'a pas encore été passée. La question étudiée dans les prochaines sections est de déterminer si la meilleure stratégie pour les scientifiques, en tant que joueurs rationnels individuels, est aussi d'adopter une telle stratégie de publication. Il s'agit de la question classique d'un désaccord possible entre les exigences de la rationalité de la communauté et de la rationalité individuelle : est-ce que des buts égoïstes freinent le progrès de la communauté, même lorsqu'ils sont épistémiques ?

4.2 Cas du modèle avec l'hypothèse de temps fini

Dans cette section, je considère le modèle avec l'hypothèse de temps fini : la chaîne des étapes est potentiellement infinie, mais il y a seulement n intervalles de temps, après lesquels les scientifiques additionnent leurs récompenses. Je montre en annexe (section 1, p. 257) le théorème suivant :

Théorème 1 : Dans le modèle de la section 3 avec l'hypothèse de temps

fini, la meilleure stratégie pour un scientifique est de publier immédiatement chaque étape intermédiaire qu'il atteint.

Pour donner une idée de ce qui justifie ce résultat, voici une esquisse de la preuve. Le théorème se prouve par récurrence sur le nombre d'intervalles temporels restant, pour le scientifique A. On considère tout d'abord le cas où il ne reste qu'un seul intervalle de temps. Il est utile de distinguer deux genres d'étapes : celles que A et B ont passées tous les deux mais n'ont pas encore publiées (appelons-les les « étapes communes ») et les étapes que A est le seul à avoir passées, dans le cas où il est devant B (appelons-les les « étapes solitaires »). Considérons les étapes communes (par exemple, k étapes) : elles représentent potentiellement une récompense pour A, qui vaut kv dans le meilleur des cas, c'est-à-dire si B ne les publie pas avant A. Il est clair que A devrait les publier immédiatement, car il ne peut rien gagner à attendre, mais seulement perdre la récompense potentielle si B se décide à publier avant lui. Aussi, la seule question pour A est de savoir s'il doit publier ses étapes solitaires, lorsqu'il en a. La démonstration éclaire la raison pour laquelle A devrait publier une étape solitaire : s'il ne la publie pas, alors chaque fois que sa recherche échoue et que la recherche de B est couronnée de succès, B atteint une étape que A a passée mais n'a pas publiée ; B sera maintenant capable de la publier, de sorte que le résultat global est que A a simplement perdu la récompense potentielle pour cette étape. Si, à l'inverse, A a déjà publié ses étapes solitaires, le succès de B se fera sur des étapes libres, c'est-à-dire que A n'a pas encore franchies. Ce faisant, B gagne certes des récompenses, mais surtout A ne perd pas de récompense potentielle (rappelons que le nombre d'étapes n'est pas limité ; seul le temps l'est). Du point de vue de A, la morale est que, si B doit avancer d'une étape, il est mieux qu'il le fasse sur une étape libre, c'est-à-dire sur une étape que A n'a pas encore passée. C'est exactement ce que la société veut, à savoir que la recherche soit entreprise et couronnée de succès de nouvelles étapes libres et non pas gâchée sur des étapes qui auraient déjà été passées par d'autres, mais pas encore publiées. Cela explique pourquoi la meilleure stratégie pour un scientifique individuel est la même que pour la société, dans ce cas. Dans l'annexe (section 1) on remarque que le théorème est prouvé non pas seulement en moyenne, mais pour chaque résultat possible de la recherche. Le théorème ne dépend donc pas de l'hypothèse selon laquelle le scientifique est neutre vis-à-vis du risque et il serait aussi vrai si cette hypothèse était retirée. Enfin, une remarque sur la distinction entre les étapes communes et solitaires. Comme les scientifiques ne savent pas exactement où est leur concurrent, un scientifique ne peut savoir si une étape qu'il

franchit est commune ou solitaire. Cela invalide-t-il le résultat avancé ? Non, dans la mesure où seul le raisonnement s'appuie sur cette distinction, mais que la meilleure stratégie que les scientifiques doivent suivre ne s'appuie pas sur cette distinction — ils doivent toujours publier. Je ferai d'autres commentaires sur le théorème 1 dans la section suivante 4.3, car le résultat sera similaire.

4.3 Cas du modèle avec l'hypothèse de chaîne finie

Je considère à présent le modèle avec l'hypothèse de chaîne finie et non plus de temps fini. Je montre en annexe, section 2, p. 260, le théorème énonçant que la meilleure stratégie est encore la même, à savoir :

> **Théorème 2 :**
> Dans le modèle de la section 3 avec l'hypothèse de chaîne finie, la meilleure stratégie pour un scientifique est de publier immédiatement chaque étape intermédiaire qu'il atteint.

Voici une esquisse de la preuve de ce théorème. Comme dans le cas précédent, on distingue entre les étapes communes et solitaires, parmi les étapes que A a passées. Pour des raisons similaires, A devrait publier les étapes communes dès que possible : la question de publier une étape ne concerne que les étapes solitaires. Il est utile de comparer deux stratégies :

- Stratégie I : toujours publier une étape franchie.
- Stratégie II : toujours publier les étapes communes, mais jamais les étapes solitaires (les publier seulement lorsqu'on atteint la dernière étape de la chaîne).

Prouver le théorème revient à montrer que les scientifiques devraient adopter la stratégie I. On montre que c'est le cas pour un scientifique donné, quelle que soit la stratégie adoptée par son concurrent, donc la stratégie I est un équilibre de Nash. De nouveau, l'hypothèse de neutralité au risque est superflue ici.

Considérons à présent le modèle dans sa globalité, avec les résultats des théorèmes 1 et 2. Il existe un accord entre la rationalité individuelle et collective, puisque les deux considèrent que la stratégie I est la meilleure. Il n'y a pas de différence non plus entre la meilleure stratégie pour le court ou le long terme, puisque le résultat ne dépend ni de l ni de n. Qu'en est-il des limites du modèle ? Il n'y a pas de condition dans le modèle sur la taille des étapes et j'ai supposé qu'elle est fixée de façon externe

par les standards de la discipline. Je reviens à présent sur ce point. Les théorèmes précédents impliquent que le fait de publier une étape sur deux est moins bon que de publier chaque étape. Inversement, supposons qu'un nouveau journal se crée, qui accepterait de publier chaque étape de la chaîne, mais aussi des demi-étapes. À partir des théorèmes précédents, les scientifiques voudront profiter de ce nouveau journal pour publier les demi-étapes. De manière générale, ils préféreront toujours que les étapes publiables puissent être plus petites : au fil du temps, la taille des étapes publiables devrait seulement diminuer. Cette conclusion pourrait expliquer que ce fait a été vérifié historiquement. Est-ce que la taille d'une étape publiable pourrait être aussi petite que possible ? Certains effets qui ont été négligés dans le modèle pourraient jouer un rôle en réalité. En particulier, le coût associé à l'écriture, à la relecture et à la publication d'un nombre croissant d'articles devrait être pris en compte, de même que le coût associé au fait de rechercher et d'obtenir l'information pertinente afin de la réutiliser. Cela pourrait rendre compte de l'existence d'un seuil minimal pour la taille d'un résultat publiable. Il pourrait exister d'autres raisons pour ce seuil et certaines vont être étudiées dans la prochaine section.

4.4 Quand devrait-on ne pas publier les étapes intermédiaires ? Deux modifications du modèle.

Dans le modèle étudié jusqu'à présent, la meilleure stratégie pour un scientifique consiste toujours à publier chaque étape franchie, quelle que soit la fin du jeu. À quoi un autre modèle devrait ressembler pour que la meilleure stratégie soit de ne pas publier ? Cette section se propose de déterminer un tel modèle. Il sera bâti sur le modèle précédent, dont je considérerai successivement deux modifications : tout d'abord (section 4.4.1), les étapes peuvent recevoir des récompenses différentes $v(k)$ au lieu d'une même récompense v (c'est la « récompense inhomogène ») ; ensuite (section 4.4.2), certaines étapes peuvent être plus difficiles que d'autres à passer, avec une probabilité $p(k)$ qui dépend de l'étape (c'est la « difficulté inhomogène »). Pour chaque type de modification, il s'agira de déterminer pour quels profils $v(k)$ ou $p(k)$ la meilleure stratégie est de ne pas publier les étapes intermédiaires.

4.4.1 Une récompense inhomogène

Commençons avec un cas simple de récompense inhomogène. Considérons une chaîne de deux étapes, avec la première étape qui vaut $v_1 = 0$ et la seconde qui vaut $v_2 = v$. Supposons que A passe la première étape : publier ne lui donne pas d'avantage

(pas de récompense) et seulement des inconvénients, parce cela fait progresser B et permet à B de concourir plus facilement pour la récompense v, aux dépens de A qui aurait pu conserver son avance. Ainsi, les scientifiques ne devraient pas publier après la première étape, mais seulement lorsqu'ils atteignent la seconde et dernière étape. Ce modèle simple peut sembler irréaliste, mais il suggère néanmoins certaines idées : si la récompense est très faible au début, et plus grande à la fin de la chaîne, le compromis devrait être similaire et un scientifique pourrait avoir intérêt à attendre la dernière étape pour publier. Je vais préciser cette idée intuitive dans le cas d'une chaîne à deux étapes et déterminer quantitativement la relation entre v_1 et v_2 pour laquelle les scientifiques ne devraient pas publier après la première étape (avec plus de deux étapes, les calculs deviennent beaucoup plus compliqués, sans apporter une meilleure compréhension de la situation).

Auparavant, je dois discuter brièvement des stratégies que je considère. Comme auparavant, il est clair que A devrait publier une étape commune et aussi qu'il ne peut pas savoir en pratique quelles étapes sont solitaires ou communes. Comme cette section 4.4 s'intéresse aux situations dans lesquelles la meilleure stratégie est de ne pas publier, je vais définir une nouvelle stratégie III. Je vais comparer :

- Stratégie I : toujours publier une étape franchie.
- Stratégie III : ne jamais publier d'étape intermédiaire — publier tout à la dernière étape seulement.

Le théorème 3 énonce pour quel profil de récompense la stratégie III est meilleure que la stratégie I :

Théorème 3 :
Pour une chaîne avec deux étapes avec des récompenses v_1 et v_2,

$$v_2 > \frac{2-p}{1-p} v_1 \tag{6.1}$$

est la condition exacte pour laquelle la meilleure stratégie est de ne pas publier une étape intermédiaire (qu'elle soit solitaire ou commune) lorsqu'on la franchit et de la publier seulement lorsqu'on atteint la dernière étape (stratégie III).

La preuve du théorème 3 se trouve en annexe, section 3, p. 263. Voici quelques commentaires sur ce résultat. Tout d'abord, les scientifiques ne devraient pas publier une étape intermédiaire s'ils ne sont pas récompensés suffisamment, par comparaison à ce qu'ils peuvent attendre de l'étape suivante. Cela donne une limite à la taille de ce que les scientifiques devraient publier. Noter cependant que la valeur de ce seuil n'est pas fixée une fois pour toute : au contraire, elle dépend seulement de la valeur relative de la récompense par rapport à la récompense suivante. Si on suppose que p est petit (c'est-à-dire que la recherche est difficile, ce qui semble une hypothèse raisonnable), l'équation 6.1 devient à peu près $v_2 > 2v_1$. Le théorème 3 énonce ainsi que, si et seulement si la seconde étape donne une récompense deux fois plus grande que la première, alors les scientifiques ne devraient pas publier la première avant d'atteindre la seconde.

Un second point à noter est que le théorème 3 est seulement prouvé en moyenne (cf. section 3 de l'annexe), au contraire des précédents résultats, aux sections 4.2 et 4.3. Pour certains résultats de la recherche de A et de B, la stratégie III peut être moins bonne que la stratégie I. C'est seulement parce que la stratégie III donne *en moyenne* une plus grande récompense qu'elle est considérée comme meilleure. Autrement dit, la validité du théorème 3 dépend de l'hypothèse selon laquelle les scientifiques sont neutres vis-à-vis du risque (cf. section 3.2). Si les scientifiques étaient averses au risque, le théorème 3 serait faux — ou plutôt il serait vrai avec un profil de récompense plus exigeant.

4.4.2 Une difficulté inhomogène

Je me tourne à présent vers une chaîne avec une difficulté inhomogène (mais avec une récompense homogène). Pour commencer avec un exemple simple, considérons une chaîne de deux étapes : la première est difficile à passer (p_1 est proche de 0), la seconde est passée sans aucune difficulté ($p_2 = 1$). Ainsi, un scientifique qui passe la première étape obtient presque la seconde gratuitement. S'il passe la première étape, il semble qu'il devrait attendre un intervalle de temps supplémentaire pour être capable de publier les deux étapes. En effet, il y a très peu de chance que pendant ce temps son concurrent passe la première étape ; et s'il publiait la première étape immédiatement après l'avoir passée, son concurrent passerait la seconde étape comme lui et il devrait partager la récompense correspondante. Ce raisonnement s'appuie sur un cas limite : je vais préciser cette idée intuitive dans le cas d'une chaîne à deux étapes et déterminer quantitativement la relation entre p_1 et p_2 pour laquelle les

scientifiques ne devraient pas publier après la première étape. Je vais comparer les stratégies I et III de la section 4.4.1. Le théorème 4 énonce le profile de récompense pour lequel la stratégie III est meilleure que la stratégie I :

Théorème 4 :
Dans une chaîne avec deux étapes qui ont des probabilités p_1 et p_2,

$$p_2 > \frac{2 - p_1}{1 - p_1} p_1 \tag{6.2}$$

est la condition exacte pour laquelle un scientifique a intérêt à ne pas publier l'étape intermédiaire (qu'elle soit solitaire ou commune) lorsqu'il la franchit, mais de la publier seulement lorsqu'il atteint la dernière étape.

La preuve du théorème se trouve dans l'annexe, section 4, p. 265. Les commentaires sont semblables à ceux concernant le théorème 3. Tout d'abord, les scientifiques ne devraient pas publier une étape intermédiaire si l'étape suivante est bien plus facile. Si on suppose que p est petit, l'éq. 6.2 devient $p_2 > 2p_1$. Le théorème 4 énonce alors que, si et seulement si la seconde étape est deux fois plus facile que la première, les scientifiques ne devraient pas publier la première étape avant d'avoir atteint la seconde. Une seconde remarque est que le théorème 4 est seulement prouvé en moyenne : sa validité dépend de l'hypothèse selon laquelle les scientifiques sont neutres vis-à-vis du risque.

4.5 Discussion des résultats

Je vais à présent discuter comment les modèles simples des sections 4.2-4.4 et leurs résultats peuvent être utilisés pour traiter de situations plus réelles et complexes. Il me semble que les résultats de la section 4.4 à propos des chaînes inhomogènes ne doivent pas être interprétées comme énonçant que la plupart des résultats intermédiaires ne devraient pas être publiés. Au contraire, ils sont capables de rendre compte de la taille minimale des résultats publiés, ou bien à cause de la récompense relative, ou bien à cause de la difficulté relative. Considérons en effet une longue chaîne d'étapes avec des récompenses variées. Les résultats de la section 4.4 sont[17] que les inhomogénéités de la récompense vont donner naissance à des seuils locaux, en-dessous desquels les trop petites étapes ne seront pas publiées lorsqu'elles seront franchies.

[17] Je suppose ici que les tendances qui ont été montrées sur des situations idéalisées, par exemple sur de courtes chaînes, persisteraient à peu près de la même façon dans des situations plus complexes ou des chaînes plus longues.

Elles seront plutôt publiées avec, par exemple, l'étape suivante : pour la publication, les étapes irrégulières s'agrègent en de plus grosses étapes, de récompense comparable. Ces plus grosses étapes définissent une nouvelle chaîne d'étapes plus homogènes avec (presque) la même récompense. Cette dernière chaîne correspond aux hypothèses de la section 4.3 : de telles étapes intermédiaires devraient être publiées. La même chose peut être dite d'une chaîne dont les étapes ont des difficultés inégales : les étapes s'agrègeront et seront publiées en plus grosses étapes, de telle façon que la difficulté de ces plus grosses étapes soit comparable. Cela définit alors une nouvelle chaîne (presque) homogène, dont les étapes intermédiaires devraient être publiées par les scientifiques qui les franchissent. Dans le cas où il y a un mélange d'étapes dont à la fois la récompense et la difficulté varient, les étapes s'agrègeront de façon à ce que la récompense attendue (récompense fois probabilité) soit à peu près la même. Pour résumer, le résultat net de la section 4.4 est de redéfinir la taille de ce qui devrait être considéré pour la publication et la section 4.3 indique que cela devrait être effectivement publié immédiatement.

Comme cela a été dit à propos de la définition d'un résultat intermédiaire (section 1, notamment la clause (i) p. 216), un scientifique doit avoir une idée claire de l'étape suivante. Si ce n'est pas le cas, il ne considèrera pas l'étape comme intermédiaire, mais comme finale et devrait la publier. Il semble que les scientifiques se trouvent souvent dans cette situation : il est assez rare qu'ils aient une idée précise de ce qui peut être atteint en réutilisant leur résultat — alors qu'ils savent que la plupart des résultats seront réutilisés. C'est lorsqu'ils savent ce qui vient ensuite dans la recherche que les scientifiques peuvent avoir des raisons de ne pas publier. Mais le modèle prouve la chose suivante : même si les scientifiques connaissaient toutes les étapes d'une chaîne très longue, même s'ils savaient que chaque étape est seulement intermédiaire, ils devraient publier régulièrement sur cette chaîne (peut-être pas après chaque étape, mais au moins après des étapes agrégées, définies en fonction des difficultés et récompenses relatives). Aussi, le conflit entre la rationalité individuelle et collective est presque dissout : les scientifiques ont intérêt à publier les étapes intermédiaires comme la communauté le désire. La seule différence peut exister pour les étapes qui s'agrègent avant d'être publiées[18].

[18]Cependant, cette agrégation pourrait résoudre le problème d'avoir des étapes publiées trop petites, que j'avais indiqué à la section 4.3

Conclusion

Ce chapitre a porté sur la question de savoir si un scientifique a intérêt à publier un résultat qu'il sait être seulement intermédiaire, ou s'il devrait au contraire attendre et poursuivre sa recherche en vue de publier un résultat plus complet. Pour étudier ce problème, j'ai présenté un modèle de théorie des jeux, en considérant les scientifiques comme des agents rationnels dotés de préférences. Cela m'a permis de montrer que, dans le cas où les étapes successives de recherche sont similaires, un scientifique a intérêt à publier immédiatement un résultat intermédiaire qu'il obtient. Comme c'est aussi ce que préfère la société pour le progrès épistémique global, on peut conclure qu'il n'existe pas, dans ce cas, de conflit entre la rationalité individuelle (celle du scientifique) et collective (celle de la communauté). J'ai ensuite considéré quelques modifications des hypothèses du modèle, afin d'étudier dans quelles situations un scientifique n'a plus intérêt à publier un résultat intermédiaire. En discutant de la façon dont le modèle peut s'appliquer au cas général, j'ai montré que les scientifiques ont intérêt à publier leurs résultats intermédiaires, quitte à redéfinir éventuellement la taille de certains de ces résultats lorsqu'ils sont irréguliers.

Chapitre 7

La pluralité des interprétations est-elle bonne d'un point de vue pratique ?

Introduction

Dans la deuxième partie de cette thèse, j'ai étudié la pluralité des interprétations quantiques du point de vue de la pratique scientifique, en établissant notamment que les interprétations peuvent définir des pratiques scientifiques très différentes, et que la pluralité des interprétations quantique est une réalité dans la recherche scientifique. J'ai aussi analysé l'unité qui existe dans le domaine de recherche quantique. L'approche adoptée jusque là a été essentiellement descriptive. Je souhaite à présent me prononcer d'un point de vue normatif sur cette pluralité des interprétations : l'existence de plusieurs interprétations quantiques est-elle bonne pour le fonctionnement de la recherche scientifique et son progrès épistémique, d'un point de vue pratique ? En particulier, il s'agit d'évaluer la situation de la mécanique quantique telle qu'elle a été décrite dans les chapitres précédents.

De nombreux arguments pragmatiques peuvent être avancés en faveur de la pluralité des interprétations. On peut soutenir par exemple que les différentes interprétations sont autant de sources d'inspiration pour les scientifiques : il s'agit d'une aubaine dont il est utile de tirer parti[1]. Par exemple, j'ai montré au chapitre 4 (section 1.2) que les interprétations quantiques induisent chacune des questions significatives différentes. J'ai donné de nombreux exemples (section 3) du fait que les diverses interpré-

[1] C'est un avis partagé, semble-t-il, par un grand nombre de physiciens. Par exemple, le prix Nobel Gerard 't Hooft et le physicien Zeilinger (dont j'ai déjà parlé des expériences sur les algorithmes quantiques) ont exprimé cet avis lors de la conférence FFP11, en juillet 2010 à Paris, alors même qu'ils peuvent être à titre personnel en faveur de l'interprétation orthodoxe.

tations quantiques peuvent inciter ou aider à la production de résultats scientifiques majeurs.

Il existe aussi des inconvénients à l'existence d'une pluralité d'interprétations. Au chapitre 4, j'ai montré que la pratique scientifique dépend de l'interprétation quantique adoptée, donc que la pluralité d'interprétations modifie la pratique de la recherche scientifique. Il se pourrait que ces modifications nuisent au bon déroulement de la recherche. Le risque le plus important est certainement le risque que la pluralité des interprétations entraîne une division des scientifiques eux-mêmes. L'adoption d'interprétations différentes, et l'usage de formulations mathématiques et de vocabulaire particuliers attachés à ces interprétations, pourrait faire que les physiciens ne se comprennent plus s'ils n'adoptent pas la même interprétation. Ils ne pourraient plus réutiliser les travaux de leurs collègues et la recherche s'en trouverait ralentie. Aussi, une pluralité d'interprétations pourrait conduire à un éclatement de la communauté scientifique, en écoles scientifiques différentes cloisonnées, néfastes pour le progrès épistémique de l'ensemble.

Comme j'ai déjà présenté au chapitre 4 des éléments qui sont en faveur de la pluralité des interprétations, je me restreins dans le présent chapitre à évaluer les possibles inconvénients de cette pluralité. En particulier, j'étudie dans quelle mesure la division de la communauté scientifique en différentes écoles interprétatives, évoquée ci-dessus, peut être néfaste. Cela suppose naturellement de préciser l'argument qui a été esquissé, ainsi que les notions d'école ou de progrès épistémique. En étudiant les risques de cette division, l'objectif est double. D'une part, il s'agit d'identifier de façon générale les circonstances dans lesquelles une division de la communauté scientifique est mauvaise pour le fonctionnement de la recherche. D'autre part, il s'agit de porter un jugement sur la situation contemporaine de la recherche mécanique quantique, dont le constat a été dressé aux chapitres 4 et 5, pour ce qui est de la pluralité d'interprétations dans la pratique : la recherche actuelle souffre-t-elle de la pluralité d'interprétations et de leurs rôles dans la pratique scientifique ? Il s'agit indirectement de savoir si une mécanique quantique avec une seule interprétation ne serait pas meilleure pour le fonctionnement et l'organisation de la recherche.

Cela permet de reposer la question d'une autre façon. On peut considérer que ce chapitre cherche à savoir si le constat dressé dans la deuxième partie de la thèse à propos de la mécanique quantique est satisfaisant pour le fonctionnement de la recherche. En particulier, est-ce que l'unité consensuelle et l'unité par la fécondation qui ont été identifiées pour la mécanique quantique suffisent à pallier les éventuels problèmes liés à la pluralité d'interprétations ? Il se pourrait que des divisions néfastes

surviennent en dépit de ces unités.

L'étude que je propose revient à se prononcer sur le type de pluralisme (et donc de possible division) qui est acceptable dans la communauté scientifique. La thèse selon laquelle le pluralisme en science doit être valorisé (qu'il s'agisse d'une pluralité de théories, d'hypothèses, de modèles, d'approches disciplinaires, etc.) est défendue par certains courants philosophiques[2]. Je propose ici de tracer une limite entre un pluralisme acceptable et néfaste, en fonction de leur effet sur le progrès épistémique de la discipline. En effet, en me prononçant sur la pluralité des interprétations, je donne aussi des critères pour le pluralisme de façon générale. Je dois préciser que l'étude du pluralisme que je mène ne concerne que des approches théoriques équivalentes. Je n'aborde donc pas ici la question de l'opportunité d'une compétition entre des théories différentes.

Étudier les risques de division de la communauté scientifique, avec ses impacts sur le fonctionnement de la recherche, revient à adopter le point de vue de l'épistémologie sociale. Rappelons que, selon l'expression de Kitcher, elle consiste à « identifier les propriétés des systèmes sociaux qui sont bien conçus d'un point de vue épistémique »[3]. Chercher à savoir si la pluralité des interprétations d'une théorie induit une division néfaste de la communauté scientifique satisfait parfaitement cette définition. J'adopte ainsi dans ce chapitre la même approche que dans le chapitre précédent, qui s'est occupé de la publication des résultats intermédiaires. Bien que ces problèmes puissent paraître à première vue très différents, je propose de *réinterpréter* le modèle proposé au chapitre 6 pour les publications intermédiaires afin de traiter le nouveau problème de la division de la communauté. Il apparaît ainsi que le problème des publications intermédiaires du précédent chapitre était une étape préliminaire pour les problèmes du présent chapitre.

La thèse que je défends dans ce chapitre est que, d'un point de vue général, les divisions néfastes pour le fonctionnement de la recherche scientifique sont celles qui correspondent à l'absence d'unité par la fécondation (celle que j'ai définie au chapitre 5). Pour ce qui est de la mécanique quantique, qui présente ce type d'unité, je considère donc que la pluralité des interprétations ne divise pas la communauté scientifique de manière néfaste pour le progrès épistémique. Je commence par présenter la réinterprétation des hypothèses du modèle du chapitre précédent (section 1), avant de considérer ce que ses résultats signifient pour les écoles scientifiques (section 2).

[2]Cf. par exemple Kellert *et al* (2006), ainsi que les références qu'ils indiquent dans l'introduction.
[3]Kitcher (1993), p. 303.

1 Réinterprétation des hypothèses du modèle du chapitre 6 pour le cas des écoles scientifiques

Dans cette section, je présente une réinterprétation du modèle du chapitre 6 afin qu'il puisse être appliqué aux écoles interprétatives. Pour la simplicité de la présentation, je considère que ces écoles concernent les interprétations de la mécanique quantique. Cependant, une généralisation à d'autres types d'écoles, qui se divisent selon un paramètre X (comme au chapitre 5, section 2 : approches méthodologiques, styles de raisonnement, traditions expérimentales, etc.), est possible de façon naturelle et je l'indique à différents endroits. Je donne aussi quelques autres exemples historiques. L'aspect certainement le plus important de la réinterprétation consiste à expliquer pourquoi les écoles scientifiques peuvent être assimilées aux agents du modèle du chapitre précédent, qui font des recherches, franchissent des étapes, publient, reçoivent des récompenses, etc., alors que ces actions sont initialement conduites par les scientifiques individuels de ces écoles. Pour réinterpréter le modèle, je considère l'une après l'autre ses différentes hypothèses.

1.1 Une chaîne d'étapes

Le domaine de la recherche consiste en une chaîne d'étapes ou de résultats successifs (cf. fig. 7.1). La nouveauté dans ce chapitre est l'hypothèse selon laquelle chaque étape peut être publiée de différentes façons, qui correspondent à différentes interprétations de la théorie. Autrement dit, la publication d'une étape peut exister sous plusieurs versions, selon que l'une ou l'autre des interprétations quantiques (ou plus exactement, la pratique scientifique qui en est issue, cf. chapitre 4) est employée. Ainsi que je l'ai montré au chapitre 4, cela correspond à ce qui se produit dans la recherche scientifique : les scientifiques peuvent choisir de publier des articles avec l'interprétation de leur choix. Souvent, il s'agit de l'interprétation orthodoxe dans sa version minimale.

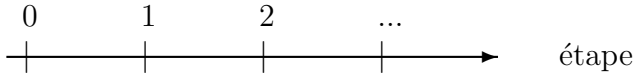

FIGURE 7.1 – La chaîne d'étapes intermédiaires qui compose le domaine de recherche.

1.2 Des écoles interprétatives

Les agents A et B considérés dans le modèle ne sont plus des scientifiques individuels mais des groupes de scientifiques. De façon générale, il peut s'agir d'équipes de recherche, de laboratoires ou d' « écoles scientifiques ». Par cette expression, j'entends un courant qui regroupe des scientifiques reliés par une certaine approche commune — méthodologique, expérimentale ou interprétative par exemple. En l'occurence, dans le cas de la mécanique quantique, ces écoles sont interprétatives : elles regroupent des scientifiques qui adoptent la même interprétation quantique et la pratique scientifique qui en est issue. On peut faire l'hypothèse qu'il existe une école bohmienne, une école orthodoxe, une école everettienne, etc. Pour simplifier, je suppose dans ce modèle que chaque scientifique adopte une et une seule interprétation quantique pour son travail de recherche. Les écoles interprétatives forment une partition de l'ensemble des scientifiques travaillant en mécanique quantique.

Dans le cadre du modèle, je simplifie la situation contemporaine de la mécanique quantique en considérant qu'il existe seulement deux écoles interprétatives, A et B. De même, je suppose que ces écoles regroupent un nombre identiques de scientifiques, de sorte qu'elles ont la même probabilité p de franchir chaque étape[4].

Le lien entre un scientifique et son école, qui ne va pas de soi, va être précisé au fur et à mesure que les détails de la réinterprétation du modèle seront présentés. J'anticipe cependant en indiquant que, au vu des hypothèses qui vont être faites, le déplacement d'un scientifique sur la chaîne d'étapes est identique au déplacement de son école. C'est ainsi que je peux dire qu'une école franchit une étape, sans distinguer quel scientifique individuel le fait.

1.3 Publication

À chaque intervalle temporel, un scientifique entreprend des recherches, afin de passer à l'étape suivante. De façon indirecte, on peut dire qu'une école entreprend elle aussi des recherches, à travers chacun de ses scientifiques. Si la recherche d'un scientifique est courronée de succès, il a la possibilité de publier cette étape. La réinterprétation du modèle va donner une nouveau sens à la publication. Rappelons que dans le modèle du chapitre précédent, publier une étape signifie que le concurrent

[4] Cette hypothèse suppose que les interprétations quantiques permettent de résoudre les problèmes avec la même facilité. Or j'ai indiqué au chapitre 4 qu'une interprétation particulière peut être au contraire une aide pour la résolution d'un problème donné. Je ne prétends pas revenir ici sur cette affirmation. Simplement, je considère ici un cas moyen pour lequel aucune interprétation n'apporte un avantage particulier.

a accès au résultat et franchit cette étape ; ne pas publier signifie que le concurrent ne peut franchir cette étape (à moins qu'il n'ait lui-même obtenu le résultat par sa propre recherche). Pour les mouvements des scientifiques sur la chaîne, c'est là tout le sens qui est attaché à la décision de « publier » (en plus du fait de fournir une récompense, ce dont je discute dans la section suivante).

La réinterprétation du modèle avec les écoles scientifiques doit conserver ce sens : publier signifie que l'école concurrente a accès au résultat et franchit l'étape ; ne pas publier signifie que l'école concurrente ne franchit pas l'étape. Aussi, je propose la réinterprétation suivante. Un scientifique qui franchit une étape a le choix entre deux façons de publier : ou bien publier pour son école scientifique seulement, ou bien publier pour toute la communauté (c'est-à-dire pour les deux écoles)[5]. Cette différence tient à la façon dont le scientifique rédige l'article : voyons le détail du processus.

Dans le premier cas, le scientifique publie pour son école. Je suppose qu'il publie le résultat obtenu en se servant de l'interprétation de son école (c'est-à-dire en employant la pratique scientifique qui en est issue). Par conséquent, les scientifiques de son école, qui partagent cette interprétation, peuvent comprendre le résultat. Je considère donc qu'ils franchissent l'étape, suite à cette publication (pour ces scientifiques, le processus est le même que dans le cas du modèle du chapitre précédent). Ainsi, lorsqu'un scientifique franchit une étape, les collègues de son école la franchissent avec lui, et on peut considérer que le succès d'un scientifique est celui de toute son école. La conséquence de la publication est que l'école toute entière avance d'une étape. Qu'en est-il des scientifiques de l'école concurrente ? Ici, je fais l'hypothèse importante selon laquelle ces scientifiques ne sont pas capables de comprendre le résultat publié parce qu'il est exprimé avec une autre interprétation quantique que celles qu'ils adoptent. Il s'agit là d'une idéalisation importante, mais qui traduit le fait que les écoles puissent être cloisonnées entre elles (qui est le problème que j'étudie ici). Par simplicité, j'attribue l'absence de compréhension à la façon dont l'article publié est rédigé, mais cela peut être réalisé par d'autres moyens. Par exemple, les scientifiques peuvent publier dans des journaux spécifiques, qui sont lus seulement par les membres de leur école (je reviens sur ce point plus bas).

Dans le second cas, le scientifique publie pour les deux écoles. Je suppose qu'il publie son résultat en se servant d'une interprétation comprise par tous[6], de sorte que

[5]Pour simplifier la discussion, je suppose qu'un scientifique ne choisit jamais de ne pas publier du tout un résultat qu'il obtient. Je reviens plus loin sur cette hypothèse.

[6]Notons en passant que cela reviens à faire l'hypothèse qu'il existe une certaine pratique scientifique consensuelle parmi tous les scientifiques, par exemple acceptée de façon instrumentaliste et pragmatique, donc une unité au sens de Kitcher (cf. chapitre 5).

tous les scientifiques comprennent le résultat. Par conséquent, tous les scientifiques franchissent cette étape, et on peut donc considérer que les deux écoles franchissent l'étape.

Dans les deux cas, on constate qu'une école scientifique progresse autant, pour ce qui est des étapes franchies, que les scientifiques individuels de cette école. Cela justifie la simplification du langage suivante : au lieu de dire qu'un scientifique franchit une étape et la publie ou bien pour toutes les écoles ou bien pour son école, je peux dire qu'une école franchit une étape et la publie (sous-entendu : pour l'autre école) ou ne la publie pas (sous-entendu : seuls les membres de cette école franchissent l'étape). Dans le langage en terme d'école qui publie ou ne publie pas, on retrouve exactement la même dynamique que les scientifiques individuels du modèle du chapitre précédent.

Quelques commentaires méritent d'être faits sur la différence entre les deux types de publication (pour son école ou pour l'ensemble de la communauté) et sur le choix lui-même par le scientifique. Il peut arriver que le choix du type de publication ne soit pas volontaire de la part du scientifique. Ici, j'ai supposé par simplification que chaque résultat peut prendre des formes différentes, selon l'interprétation adoptée pour la publication. Cela suppose qu'il existe une équivalence bien établie entre les différentes interprétations. Or il existe plusieurs cas historiques dans lesquels cette équivalence n'était pas encore établie. Considérons par exemple les publications de Heisenberg et de Schrödinger au début de 1926[7]. Leurs articles portent sur les bases mathématiques de la mécanique quantique et ils proposent des approches qui se conçoivent comme concurrentes. Ils ne comprennent pas particulièrement les résultats l'un de l'autre. Cependant, il sera démontré au cours de cette année 1926 que ces approches sont équivalentes. Selon l'analyse que j'ai proposée, il s'agit donc de deux interprétations quantiques différentes qui reposent sur des formulations mathématiques associées (très) différentes. On peut avoir la lecture simplifiée suivante : Schrödinger et Heisenberg ne savaient pas qu'ils proposaient un même résultat, rédigé sous des interprétations différentes ; leur publication n'était pas compréhensible par l'autre école (à supposer qu'il existe effectivement une école autour de chacun d'eux). On peut donc considérer que leurs résultats ont été publiés, de façon involontaire, seulement pour leur école. Un autre exemple historique consiste dans les travaux de l'électrodynamique quantique, dans les années 1940[8]. Feynman, Tomonaga et Schwinger ont proposé indépendamment des approches différentes pour la formulation d'une théorie.

[7]Pour une présentation historique de ce sujet, on peut consulter notamment Jammer (1966), chapitre 5, Beller (1999), chapitre 2, van der Waerden (1973) et Darrigol (1992), chapitres 10 et 13.

[8]Je renvoie à Cao (1997), Kaiser (2005) et Schweber (1994).

L'équivalence entre leurs approches n'a été montrée qu'à partir de 1948 par Dyson. Auparavant, ils ne comprenaient pas mutuellement leurs travaux (Tomonaga publiait d'ailleurs dans des journaux japonais que les américains ne lisaient pas). Ces deux exemples, en mécanique quantique et en théorie quantique des champs, montrent que le choix de publier pour son école ou pour toutes les écoles n'est pas toujours délibéré. En l'occurence, ces physiciens n'ont jamais cherché à empêcher les autres de comprendre leurs travaux, et ont été heureux de l'équivalence lorsqu'elle a été montrée.

Une dernière caractéristique du modèle concernant la publication doit être réinterprétée : il s'agit du fait que, si un agent franchit une étape mais ne la publie pas, un autre agent peut prétendre publier cette étape. Dans le cas des écoles, cela doit correspondre à la possibilité suivante : après qu'un scientifique a franchit une étape et l'a publiée pour son école, un scientifique d'une autre école peut prétendre publier ce même résultat au sein de son école à lui. Je souhaite indiquer que cette réinterprétation est réaliste dans la mesure où elle recouvre certains cas historiques. Reprenons l'exemple de Schrödinger et de Heisenberg en 1926 : j'ai indiqué qu'on peut considérer que tous deux franchissent une même étape, mais l'expriment dans des interprétations différentes. Or, après que Heisenberg a publié ses travaux en 1925, Schrödinger parvient effectivement à publier les siens au début de 1926 — on le lui oppose pas le fait qu'ils aient déjà été publiés sous une autre forme, pour la bonne raison que l'équivalence n'était pas connue à ce moment. L'exemple de l'électrodynamique quantique est similaire : Tomonaga publie tout d'abord ses résultats en japonais de 1943 à 1946, puis Schwinger publie des résultats équivalents (sans le savoir encore) en 1948, tandis que Feynman propose une autre résolution du problème. Le fait qu'ils reçoivent tous les trois, en 1965, le prix Nobel de Physique pour ces travaux (chacun dans la même proportion d'un tiers du prix) est une reconnaissance du fait que tous les trois ont obtenu le même résultat indépendamment : le fait que l'un publie pour son école n'empêche pas les autres de le faire aussi ultérieurement.

1.4 Récompense

Voyons ce qui concerne l'interprétation de la récompense liée à une publication, de valeur v. Comme dans le modèle initial, je suppose que cette récompense peut recevoir au choix une interprétation épistémique (pour la connaissance produite) ou non-épistémique (pour la célébrité ou l'argent reçus). Dans la réinterprétation, il s'agit de conserver deux caractéristiques du modèle initial : lorsqu'un agent publie un article

pour toute la communauté, cette dernière attribue une récompense ; lorsque l'agent ne publie pas le résultat (que celui-ci n'est pas accessible à l'ensemble de la communauté), aucune récompense ne lui est attribuée. Dans le modèle réinterprété où les agents A et B sont des écoles scientifiques, il faut qu'on considère que les écoles elles-mêmes reçoivent une récompense lorsqu'elles publient pour l'ensemble de la communauté, et n'en reçoivent pas si elles conservent le résultat en interne.

Voici comment cela peut se justifier. Supposons qu'un scientifique publie pour l'ensemble de la communauté : il reçoit une récompense de la part de cette communauté. On peut supposer que l'école interprétative à laquelle appartient le scientifique est rendue public (par exemple, il figure à travers son institution de rattachement : « Laboratoire de l'école bohmienne, ... »). Par conséquent, l'école scientifique à laquelle appartient le scientifique est créditée d'une certaine renommée. Il est donc plausible de considérer que l'école scientifique elle-même reçoit une récompense, et c'est l'hypothèse que je fais ici. Ainsi, je considère le raccourci suivant : lorsqu'un scientifique publie pour la communauté et reçoit une récompense, c'est comme si l'école elle-même publiait pour la communauté et recevait une récompense. Cela est cohérent avec ce que le modèle initial suppose lorsqu'un agent (ici, une école) publie un résultat.

Supposons à présent que le scientifique ne publie son résultat que pour son école. Puisque le résultat n'est pas accessible pour l'ensemble de la communauté scientifique, celle-ci ne délivre pas de récompense (elle ne le reconnaît pas comme résultat utile à tous). On considère alors que l'école à laquelle appartient le scientifique ne reçoit pas de récompense non plus. Ainsi, je considère le raccourci suivant : lorsqu'un scientifique ne publie que pour son école et ne reçoit pas de récompense de la part de la communauté, c'est comme si l'école elle-même ne publiait pas pour la communauté et ne recevait pas de récompense. Dans les deux cas, on retrouve le fait qu'un agent (ici, une école) ne reçoit de récompense de la part de la communauté que lorsqu'il publie un résultat accessible à la communauté.

1.5 Fin du jeu

La réinterprétation du modèle conserve les deux types de fin du jeu : ou bien un nombre limité d'étapes (c'est l'hypothèse de « chaîne finie ») ou bien un nombre limité d'intervalles temporels (c'est l'hypothèse de « temps fini »). Dans le modèle, la fin du jeu suppose que tous les résultats obtenus sont publiés pour toute la communauté, afin que toutes les récompenses soient attribuées. Si des écoles n'ont pas publié pour toute la communauté, alors la fin du jeu exige qu'elles le fassent. Si elles

ne se considéraient pas comme des écoles équivalentes, la fin du jeu doit correspondre au moment où leur équivalence est prouvée. Par exemple, dans les cas historiques que j'ai présenté pour lesquels les approches n'étaient pas initialement conçues comme équivalentes (Heisenberg et Schrödinger ; Tomonaga, Schwinger et Feynman), cette fin du jeu correspond au moment où l'équivalence entre les approches est prouvée (respectivement, en 1926 par Schrödinger, Pauli et Eckart ; en 1949 par Dyson).

Dans quelle mesure est-il légitime d'assimiler les écoles scientifiques à des agents rationnels dotés de préférence, qui décident d'une stratégie de publication ? Les scientifiques individuels de ces écoles sont dans ce cas. Supposons qu'ils se soucient de la récompense reçue par leur école. Par exemple, ils espèrent que le fait que beaucoup d'articles soient écrits sous le nom de leur école permettra que leur interprétation finisse par s'imposer dans la communauté scientifique. Ces scientifiques individuels choisiront de publier pour leur école ou pour toute la communauté en fonction de ce qu'ils estiment être le mieux pour la récompense totale de l'école, à la fin du jeu. Or j'ai indiqué que la publication faite à ce niveau individuel peut être considérée comme étant le fait de l'école elle-même. Par conséquent, cela est cohérent avec le fait de supposer que l'école elle-même décide de publier pour la communauté en se souciant de sa récompense finale. Il est donc légitime d'assimiler les écoles à des agents dotés de préférence. Cela conclut la réinterprétation du modèle : les écoles scientifiques, à travers leurs scientifiques individuels, peuvent être assimilées aux agents A et B du modèle du chapitre précédent, qui font des recherches, franchissent des étapes, publient, reçoivent des récompenses, etc.

Dans cette section 1, j'ai proposé une réinterprétation du modèle du chapitre précédent, afin qu'il puisse concerner les écoles scientifiques. J'ai notamment montré qu'il est possible de considérer ces écoles comme si elles étaient des agents qui accomplissent certaines actions (entreprendre des recherches, publier, recevoir une récompense, etc.).

2 Le risque de division entre les écoles

La section précédente a montré comment le modèle du chapitre précédent peut être réinterprété pour s'appliquer aux écoles scientifiques. Il est désormais possible de réinterpréter les résultats de ce modèle pour répondre au problème étudié dans ce chapitre : dans quelles circonstances la division d'une communauté entre des écoles scientifiques peut-elle être néfaste pour le fonctionnement de la recherche ? Il s'agit aussi de se prononcer sur la situation concrète de la pluralité des interprétations en

mécanique quantique. Dans cette section, je défends la thèse selon laquelle les divisions néfastes au progrès de la discipline correspondent à des écoles scientifiques cloisonnées, dans lesquelles les scientifiques ne publient que pour leur école. Je montre que cela correspond à une absence d'unité par la fécondation. Cela me permet de considérer que la recherche contemporaine en mécanique quantique ne souffre pas de la pluralité des interprétations.

Le plan de la section est le suivant : je commence par préciser quelles questions peuvent être étudiées dans le cadre du modèle réinterprété (section 2.1). Je présente ensuite les résultats du modèle réinterprété (section 2.2). Je fais le lien entre le modèle et la notion d'unité par la fécondation (section 2.3), ce qui me permet ensuite d'étudier les divisions néfastes dans la communauté (section 2.4), et de me prononcer sur le cas de la mécanique quantique (section 2.5). Enfin, je précise comment mes analyses permettent de se positionner vis-à-vis du pluralisme de façon générale (section 2.6).

2.1 Le problème

Dans le cadre de la réinterprétation du modèle de la publication pour des écoles scientifiques (présentée dans la section 1), il est possible d'explorer les questions suivantes. Dans quelles circonstances une école scientifique, intéressée par sa propre récompense, fera-t-elle le choix de ne pas publier pour les autres écoles, entraînant une division de la communauté ?[9] De façon générale, quelles sont les divisions néfastes pour la communauté scientifique ? Cela suppose d'étudier la stratégie de publication optimale pour une école particulière, ainsi que celle qui est optimale pour la communauté dans son ensemble. Pour la communauté dans son ensemble, il est préférable que davantage de résultats soient connus pour tous, ou bien qu'un résultat soit connu pour tous le plus tôt possible. La question de la stratégie de publication optimale pour une école peut se réexprimer au niveau du scientifique individuel. Pour lui, il s'agit de savoir s'il doit publier de sorte à ce que toutes les écoles puissent réutiliser son résultat, ou au contraire publier seulement pour les scientifiques de son école interprétative. Comme dans le chapitre précédent, il s'agit d'étudier le risque qu'il existe un désaccord entre la rationalité individuelle (ici, celle d'une école scientifique) et la rationalité collective de la communauté dans son ensemble. Par exemple, les écoles pourraient avoir intérêt à se cloisonner et à ne pas publier pour leurs concurrentes, tandis que la communauté pourrait souhaiter qu'elles publient pour tous.

[9] Dans le cas où les écoles ne savent pas encore que leurs travaux pourraient être équivalents, j'ai indiqué que ce choix n'est pas délibéré. La question devient alors : auraient-elles préféré que l'équivalence soit établie plus tôt, ou le plus tard possible ?

Une remarque doit être apportée concernant ce qui peut être étudié avec ce modèle. Je fais l'hypothèse que les travaux des écoles sont équivalents : ils ne peuvent différer que par la forme qu'ils prennent, par exemple en employant une interprétation quantique particulière. Si les écoles estiment que leurs travaux ne sont pas équivalents, le modèle ne s'applique qu'à condition qu'il existe un moment où cette équivalence est établie. En aucun cas il ne s'agit d'appliquer ce modèle à des travaux qui ne soient en réalité pas équivalents, et qui appartiendraient à des théories concurrentes et différentes. Je n'aborde donc pas ici la question de l'opportunité d'une compétition entre des théories différentes.

2.2 Résultats du modèle réinterprété

Les résultats de la section 4 du chapitre précédent peuvent être réinterprétés pour s'appliquer aux stratégies de publication des écoles scientifiques. Tout d'abord, de façon générale, la communauté dans son ensemble estime que la meilleure stratégie de publication, de son point de vue, est que les écoles publient immédiatement les résultats pour toute la communauté, et ne les gardent pas seulement pour elles. C'est ainsi que le plus grand nombre d'étapes peut être franchies, ou qu'elles peuvent l'être le plus rapidement possible.

Voyons à présent la stratégie optimale pour une école donnée, qui se soucie seulement de sa propre récompense. Considérons tout d'abord le cas de l'hypothèse de la chaîne homogène : les étapes ont toutes les mêmes récompenses v et les mêmes difficultés p. Les théorèmes 1 et 2 du chapitre précédent permettent d'affirmer que la meilleure stratégie pour l'école est de publier immédiatement, pour toute la communauté, les étapes qu'elle franchit. Les mêmes commentaires que dans le chapitre précédent peuvent être faits : ce résultat ne dépend pas de la nature épistémique ou non-épistémique de la récompense ; cela est valable qu'il s'agisse de court-terme ou de long-terme (selon le nombre d'étapes). Cela signifie que, dans le cas d'une chaîne homogène, les écoles n'ont pas intérêt à se cloisonner. Au contraire, elles ont intérêt à faire en sorte que leurs travaux soient compréhensibles par tous les scientifiques, quelle que soit leur interprétation. Le résultat important est qu'il n'y a pas de désaccord entre la stratégie que l'école considère comme optimale et celle que souhaite la communauté dans son ensemble.

Considérons à présent les chaînes inhomogènes, lorsque p ou v varie selon l'étape. Dans ce cas, il existe certaines configurations pour lesquelles les écoles ont intérêt à ne pas publier leurs résultats pour toute la communauté, mais à le garder en interne. Le

plus intéressant est le cas général d'une chaîne qui peut avoir certaines inhomogénéités. La discussion de la section 4.5 du chapitre précédent a montré qu'un scientifique aura intérêt à publier, non pas toutes les étapes de la chaîne, mais des étapes agglomérées, plus grosses, qui forment une nouvelle chaîne à peu près homogène. Ainsi, quitte à devoir redéfinir ce qui constitue une étape publiable, un scientifique (donc à présent : une école) a intérêt à publier immédiatement les étapes qu'il franchit. Finalement, la meilleure stratégie pour les écoles scientifiques est, comme la meilleure stratégie selon la communauté, de publier immédiatement pour tous les résultats obtenus (à la différence prêt de la redéfinition d'étapes agglomérées).

2.3 Division des écoles et unité par la fécondation

Je souhaite à présent faire le lien entre ce modèle de publication pour les écoles scientifiques et les concepts d'unité présentés dans le chapitre 5. Rappelons notamment la définition de l'unité par la fécondation que j'ai proposée (section 2.3) : un domaine de recherche est uni par la fécondation vis-à-vis des interprétations de la théorie si l'interprétation mise en jeu dans la publication n'est pas un obstacle à ce que ce travail puisse être fécond pour un nouveau travail. Or supposer que l'interprétation utilisée dans la publication ne gêne pas la fécondité de ce travail, c'est exactement supposer que l'interprétation qui figure dans l'article publié ne gêne pas sa compréhension par les autres scientifiques[10]. Dans le langage de ce modèle, cela signifie que le scientifique publie son article pour tous les scientifiques, et non pas seulement pour son école interprétative. Par conséquent, la définition d'un domaine de recherche uni par la fécondation recouvre exactement le fait que tous les scientifiques (et donc toutes les écoles) publient pour toute la communauté, et non pas seulement pour leur école. Il est équivalent de considérer que les scientifiques publient pour la communauté et de considérer qu'il existe une unité par la fécondation.

On peut donc reformuler les résultats du modèle de la façon suivante. La communauté dans son ensemble estime que la meilleure situation, d'un point de vue épistémique, réside dans l'existence d'une unité par la pluralité. Si elle n'existe pas, cela signifie que des résultats publiés ne peuvent pas être réutilisés de manière féconde par tous les scientifiques, donc entrave la progression de la recherche. De leur côté, les écoles interprétatives ont elles aussi intérêt à ce qu'existe une unité par la fécondation

[10] D'un point de vue technique, le fait qu'un scientifique accède à une étape parce qu'elle a été publiée, puis s'en serve pour atteindre l'étape suivante, revient à dire qu'il existe une relation de fécondation entre le résultat correspondant à la première étape et celui correspondant à la deuxième étape.

entre leurs travaux (à ceci prêt qu'elles considèrent des étapes agglomérées).

2.4 Quelles sont les divisions néfastes pour la communauté ?

Revenons à la question initiale de ce chapitre : quelles divisions gênent le progrès épistémique d'une communauté scientifique ? Dans le cadre du modèle que je propose, le progrès épistémique correspond aux étapes qui sont franchies et publiées, accessibles à tous les membres de la communauté. Les résultats du modèle permettent d'affirmer que ce qui gêne le progrès épistémique (dans le cadre, restreint, des hypothèses du modèle), c'est l'absence d'unité par la fécondation, lorsque des résultats sont publiés sans être compréhensibles et réutilisables par tous. Par conséquent, dans une situation de recherche qui présente une unité par la fécondation, il n'y a pas de gêne particulière qui vienne de la pluralité des interprétations. Cela est vrai du point de vue de la communauté dans son ensemble, mais aussi du point de vue des différentes écoles interprétatives : toutes sont satisfaites de la façon dont les travaux sont publiés.

2.5 Le cas de la mécanique quantique

Qu'en est-il pour la mécanique quantique contemporaine ? Elle se trouve exactement dans le cas satisfaisant qui vient d'être indiqué. J'ai montré au chapitre 5 qu'il existe une unité par la fécondation entre les travaux quantiques. Les scientifiques publient très souvent en utilisant l'interprétation orthodoxe minimale, qui est comprise par tous. Les très rares articles qui utilisent d'autres interprétations parviennent néanmoins à être compris et réutilisés (cf. chapitre 4, section 3.4). Comme les articles de mécanique quantique peuvent être réutilisés par des scientifiques qui adoptent n'importe quelle interprétation, la fécondation des travaux n'est pas entravée par la pluralité des interprétations. Aussi, à la question « la recherche en mécanique quantique souffre-t-elle de la pluralité des interprétations et des rôles qu'ils jouent dans la pratique scientifique ? », il faut répondre non sur la base des résultats de ce modèle. La pluralité des interprétations quantiques n'est pas mauvaise du point de vue pratique, pour ce qui concerne le progrès épistémique de la discipline. L'effet pervers de cloisonnement entre les écoles interprétatives n'existe pas.

Par ailleurs, ce chapitre n'étudie que les potentiels effets négatifs liés à une pluralité d'interprétations. De nombreux avantages ont été indiqués au chapitre 4 : les interprétations quantiques peuvent inciter ou aider à la production de résultats scientifiques majeurs. Par conséquent, il est possible de conclure que la pluralité des interprétations quantiques est très bonne d'un point de vue pratique. Elle n'entrave

pas le progrès de la discipline et pourrait au contraire l'encourager. Cela est vrai en dépit de ce que j'ai montré dans le chapitre 4, concernant la place importante des interprétations quantiques dans la pratique scientifique. Notamment, bien que la pluralité des interprétations soit une réalité de la pratique scientifique et qu'il n'existe pas de pratique interprétativement neutre, la pluralité d'interprétations ne gêne pas le fonctionnement de la recherche et son progrès épistémique.

2.6 Une limite au pluralisme

Disons un mot d'une possible généralisation de ces analyses. Au lieu de considérer une pluralité d'interprétations quantiques, on peut considérer une pluralité d'un paramètre X quelconque (traditions expérimentales, styles de raisonnement, etc.). Il existe alors des écoles vis-à-vis des différents X_i. Le résultat du modèle précédent est que la communauté dans son ensemble et les écoles estiment que l'existence d'une unité par la fécondation est souhaitable, pour ce qui concerne le progrès épistémique de la discipline. L'existence d'une pluralité de X ne gêne pas le progrès épistémique, pourvu qu'il existe une unité par la pluralité vis-à-vis de ce X.

Cela permet de se prononcer sur le pluralisme dans une communauté scientifique. Considérons un certain paramètre X qui affecte la pratique scientifique et qui peut exister sous plusieurs formes X_i. On suppose qu'il peut apparaître dans les travaux publiés, et qu'il est possible d'exprimer un même travail avec des X_i différents[11]. La question que je considère est la suivante : pour une communauté scientifique qui travaille sur un domaine de recherche, la pluralité de ce X est-elle bonne pour le fonctionnement de la communauté et le progrès épistémique ?

La réponse que mon modèle apporte est la suivante : si le domaine de recherche est uni par la fécondation vis-à-vis de ce X, alors le progrès épistémique n'est pas gêné par la pluralité du X. On peut donc dire que cette pluralité n'est pas néfaste au fonctionnement du domaine de recherche. Elle peut avoir aussi des avantages, mais ce modèle ne se prononce pas à leur sujet. En revanche, si la pluralité du X ne permet pas une unité par la fécondation dans le domaine de recherche, alors on peut affirmer qu'il existe des inconvénients à cette pluralité, qui gêne le fonctionnement de la recherche (il est alors nécessaire d'évaluer si ses avantages peuvent être plus grands). Le modèle que j'ai proposé pour les écoles scientifiques permet ainsi de tracer une limite : un pluralisme dans la pratique scientifique qui conduit à une unité par la fécondation

[11] Il s'agit ici d'éliminer la possiblité que ces X_i définissent des théories différentes et concurrentes, ainsi que je l'ai indiqué plus haut.

est acceptable, du point de vue du progrès épistémique du domaine. Il ne gêne pas le fonctionnement normal de la recherche qui consiste à tirer parti de la fécondité des travaux scientifiques (ce pluralisme est pour ainsi dire transparent). On remarque ainsi que le progrès scientifique (considéré du point de vue de la communauté dans son ensemble) exige seulement qu'il existe une unité par la fécondation, c'est-à-dire que les travaux soient réutilisables sans entrave. Il autorise parfaitement une certaine pluralité.

Je souhaite faire remarquer que je ne m'inscris pas dans une défense naïve du pluralisme. Il est vrai que ma conclusion concernant la mécanique quantique est que la pluralité d'interprétations n'est pas une gêne pour le fonctionnement de la recherche et le progrès épistémique. Mais cette conclusion est spécifique au cas de la mécanique quantique, et j'ai proposé une limite pour un pluralisme acceptable.

Conclusion

Ce chapitre a porté sur la question de savoir si la pluralité des interprétations d'une théorie, en l'occurence la mécanique quantique, peut être bonne d'un point de vue pratique, pour le fonctionnement de la recherche et le progrès épistémique. Comme des avantages de la pluralité d'interprétations ont été donnés dans le chapitre 4, je me suis restreins ici à étudier de possibles inconvénients. J'ai considéré le risque de division des scientifiques selon des écoles scientifiques différentes, en fonction de l'interprétation quantique qu'ils adoptent. Pour étudier ce risque, j'ai montré que le modèle d'épistémologie sociale du chapitre précédent, traitant les stratégies de publication intermédiaires, pouvait être réinterprété pour s'appliquer aux écoles scientifiques. J'ai montré que les divisions néfastes pour la communauté scientifique correspondent à un cloisonnement des écoles interprétatives, empêchant la circulation de leurs résultats vers les autres écoles. J'ai aussi montré que cela peut s'exprimer avec le concept d'unité par la fécondation que j'ai introduit au chapitre 5 : une division néfaste correspond à une absence d'unité par la fécondation. Cela m'a permis de considérer que la recherche contemporaine en mécanique quantique ne souffre pas de la pluralité des interprétations.

Conclusion

Dans ce travail, j'ai pris pour objet d'étude la pluralité des interprétations d'une théorie scientifique contemporaine, la mécanique quantique. J'ai abordé ce sujet à travers trois approches méthodologiquement différentes, qui correspondent aux trois parties de cette thèse. Dans la première partie, j'ai cherché à caractériser ce que sont les interprétations de la mécanique quantique et en quel sens il s'agit d'interprétations d'une même théorie. J'ai proposé la définition de travail selon laquelle l'interprétation d'une théorie fournit l'image d'un monde dans lequel la théorie est vraie, c'est-à-dire qu'elle doit préciser les types d'entités et de propriétés que comporte ce monde. J'ai présenté en détail trois interprétations quantiques majeures : l'interprétation orthodoxe des manuels, l'interprétation de Bohm et celle d'Everett, dite des mondes multiples. Un des points importants que j'ai établis est le fait que ces interprétations de la théorie conduisent certes à formuler des prédictions identiques au moyen de probabilités, mais que ces probabilités ne renvoient pas aux mêmes faits dans le monde. Il n'existe pas de façon interprétativement neutre de formuler des prédictions empiriques. Néanmoins, les diverses interprétations quantiques sont empiriquement indiscriminables et équivalentes. J'ai ensuite montré que la conception sémantique des théories (notamment celle de van Fraassen) permet d'analyser correctement la théorie de la mécanique quantique, en donnant un sens au fait qu'il s'agisse d'interprétations d'une même théorie et en donnant une base à leur équivalence empirique.

Dans la deuxième partie, j'ai étudié comment la pluralité des interprétations se traduit dans la pratique scientifique et quelles en sont les conséquences pour ce qui concerne l'unité du domaine de recherche quantique. Tout d'abord, j'ai repris l'analyse de Kitcher de la pratique scientifique et j'ai montré que les interprétations quantiques peuvent définir des pratiques scientifiques très différentes. Notamment, il s'avère qu'il n'est pas possible de définir une pratique scientifique qui soit neutre d'un point de vue interprétatif. J'ai présenté des exemples de travaux scientifiques majeurs qui mettent en jeu la diversité des interprétations quantiques. J'ai ensuite étudié l'unité du domaine recherche quantique. Le concept de pratique scientifique consensuelle de

Kitcher permet de mettre en évidence une unité consensuelle autour de la pratique issue de l'interprétation orthodoxe, dans une version minimale. Pour dépasser certaines limites de ce concept, j'ai proposé un nouveau concept d'unité par la fécondation. Un domaine de recherche est considéré uni par la fécondation si les travaux scientifiques peuvent être réutilisés sans que l'interprétation utilisée dans la publication ne soit un obstacle à cette réutilisation. À travers des exemples, j'ai montré que la mécanique quantique est effectivement unie par la fécondation.

Dans une troisième partie, j'ai adopté une approche d'épistémologie sociale. J'ai étudié si la pluralité des interprétations peut être une gêne pour le fonctionnement de la recherche et le progrès épistémique, d'un point de vue pratique. J'ai considéré le risque que les interprétations quantiques donnent naissance à des écoles scientifiques différentes qui deviendraient cloisonnées. Pour cela, j'ai commencé par étudier le cas plus simple de la publication de scientifiques individuels. J'ai cherché à savoir si un scientifique aurait intérêt à publier un résultat intermédiaire, ou plutôt d'attendre de publier un résultat plus complet. Pour résoudre ce problème, j'ai proposé un modèle de théorie des jeux. J'ai montré que, à quelques nuances près, les scientifiques ont intérêt à publier immédiatement leurs résultats intermédiaires. En réinterprétant ce modèle de théorie des jeux, j'ai pu l'appliquer aux écoles scientifiques. J'ai montré que la communauté dans son ensemble n'a pas intérêt à ce que les écoles se cloisonnent et empêchent leurs travaux d'être réutilisés par d'autres écoles. Cela m'a permis de conclure que la recherche contemporaine en mécanique quantique ne souffre pas de la pluralité des interprétations.

Je voudrais à présent indiquer deux pistes de recherches qui, me semble-t-il, mériteraient d'être empruntées à la suite de ce travail. La première concerne le concept d'unité par la fécondation que j'ai proposé au chapitre 5. Il s'agirait de voir s'il peut avoir une pertinence dans d'autres études de cas que la pluralité des interprétations de la mécanique quantique. Il me semble qu'il pourrait être un outil d'étude d'autres domaines, pour lesquels existe une pluralités d'autres paramètres. Par exemple, on pourrait l'appliquer à l'étude des différentes traditions expérimentales que Galison (1997) a identifiées dans la physique expérimentale des hautes énergies. Galison défend l'idée que des groupes de scientifiques qui utilisaient des instruments de mesure différents s'appuyaient sur des arguments de natures différentes. Il s'agirait, dans ce cas, d'étudier s'il a existé une réutilisation mutuelle de leurs travaux en dépit de ces divergences, et donc d'identifier une éventuelle unité par la fécondation. Il serait aussi possible d'approfondir cette notion d'unité par la fécondation en étudiant les

réutilisations entre travaux (à travers les citations, notamment) grâce à une étude empirique sur des bases de données d'articles scientifiques. Mon concept d'unité par la fécondation pourrait alors se nourrir du domaine de la scientométrie.

Une seconde piste de travail concerne le modèle de théorie des jeux pour les publications intermédiaires que j'ai proposé au chapitre 6. Il s'agirait ici d'explorer certains raffinements pour explorer de nouveaux aspects du problème. Par exemple, on pourrait étudier l'effet d'une dissymétrie entre les deux scientifiques concurrents, ou introduire un coût associé à la publication ou la lecture d'un résultat. Le plus intéressant, me semble-t-il, serait de considérer non plus une chaîne d'étapes linéaire, mais un réseau constitué de nombreuses étapes reliées par des chemins particuliers. Cette hypothèse serait certainement plus réaliste vis-à-vis de la recherche scientifique, dans laquelle un résultat peut être obtenu d'un grand nombre de manières et servir à de nombreux autres travaux.

Annexe — Preuves des théorèmes du chapitre 6

1 Preuve du théorème 1 de la section 4.2

La preuve se fait par récurrence par rapport au nombre d'intervalles temporels qui restent avant la fin du jeu. Je commence avec le cas où il reste un seul intervalle de temps et je considère le scientifique A. Deux types d'étapes ont été distingués à la section 4.2 du chapitre 6, les étapes communes et les étapes solitaires, et j'ai montré que les étapes communes devaient être publiées. Par conséquent, la seule question pour A est de savoir s'il doit publier ses étapes solitaires (par exemple, a étapes). Notons que A ne connaît pas la position réelle de B, donc il ne sait pas si ses étapes sont communes ou solitaires. Dès lors, il serait plus simple que sa stratégie soit la même pour les deux cas — sinon, la réalisation même de la stratégie pourrait être remise en question. Je vais heureusement prouver que c'est le cas.

Pour des raisons de simplicité, je suppose à présent qu'il n'y a plus d'étape commune (toutes ont été publiées). Pour le dernier intervalle temporel, A a le choix entre deux stratégies pour ses a étapes solitaires : ou bien elle les publie maintenant, ou bien elle les publie au prochain et dernier intervalle de temps (au cours de la démonstration, il sera évident que des stratégies intermédiaires, dans laquelle il publie seulement une partie des a étapes maintenant, ne serait pas meilleure).

Tout d'abord, supposons que A publie maintenant ses a étapes solitaires. Elle obtient immédiatement une récompense av. Ensuite, A et B partent de la même étape pour le dernier intervalle temporel. Le tableau 1 présente les probabilités des résultats de la recherche de A et B pendant le dernier intervalle temporel, tandis que le tableau 2 présente les récompenses correspondantes pour A. Voici comment le tableau 2 est rempli : si A échoue pendant cet intervalle (seconde ligne du tableau), il ne reçoit aucune récompense en plus de son av précédente. S'il réussit seul, (cellule

en haut à droite) elle publie une étape et reçoit v en plus de av ; si à la fois A et B réussissent (cellule en haut à gauche), A reçoit une récompense $v/2$ en plus de av.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	p^2	$p(1-p)$
échec	$p(1-p)$	$(1-p)^2$

Tableau 1 – Probabilité des résultats de la recherche de A et B, pour un intervalle temporel.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$av + v/2$	$av + v$
échec	av	av

Tableau 2 – Récompense pour A pendant le dernier intervalle temporel, lorsque A et B partent de la même étape et que A a précédemment publié seul a étapes.

La récompense moyenne attendue E_2 pour A peut être calculée en multipliant chaque cellule du tableau 1 par celle correspondant dans le tableau 2 et en ajoutant :

$$E_2 = av + pv - \frac{p^2 v}{2} \tag{1}$$

(Les récompenses attendues E ont pour indice le numéro du tableau auquel elles renvoient.)

Considérons à présent la seconde stratégie pour A : il ne publie pas maintenant, mais attend le dernier moment. Je remplis le même genre de tableau pour la récompense de A selon les résultats de la recherche pendant le dernier intervalle temporel (tableau 3). Si A réussit (première ligne), elle a passé $a + 1$ étapes en tout. Si B ne réussit pas, A publie seul et obtient v pour chacune d'elles. Mais si B réussit, il y a une étape qui est publiée par tous les deux, qui vaut $v/2$ pour A, plus $a + 1 - 1 = a$ étapes que A publie seul, et qui valent chacune v. Si A ne réussit pas (seconde ligne), il est facile d'avoir le même raisonnement avec a au lieu de $a + 1$.

La probabilité des résultats de la recherche de A et B sont les mêmes que dans le cas précédent, ce qui permet d'utiliser le même tableau 1. En multipliant les cellules correspondantes et en additionnant, on obtient que la récompense moyenne attendue pour A avec cette stratégie est

$$E_3 = av - \frac{pv}{2}. \tag{2}$$

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$av + v/2$	$(a+1)v$
échec	$av - v/2$	av

Tableau 3 – Récompense pour A, selon le résultat des recherches de A et B, pendant le dernier intervalle de temps (A commence a étapes devant B).

Cette quantité est plus petite que E_2 (la différence vaut $-p(1-p)v/2 < 0$) et voici quelques commentaires. Ce résultat pouvait être lu directement à partir d'une comparaison directe entre les tableaux 2 et 3 (parce que les deux sont multipliés ensuite par les mêmes cellules du tableau 1) : la différence est de $-v/2$ dans la cellule en bas à gauche. Qu'est-ce que cette différence signifie ? Elle correspond au cas où, pendant un intervalle de temps, A ne réussit pas et B réussit. B progresse d'une étape et arrive sur une étape déjà franchie par A. Comme A n'a pas encore publié cette étape, elle est à présent perdue pour elle — ou plutôt, la moitié $v/2$ l'est, puisque la publication sera simultanée avec B. Au contraire, avec la première stratégie, A a publié cette étape auparavant, de sorte que lorsque B avance d'une étape, il commence de la même étape que A et avance sur une étape libre (c'est-à-dire une étape que A n'a pas encore passée) et n'empêche pas A d'avoir une récompense[1]. D'où la différence de $v/2$ entre les deux stratégies dans ce cas[2].

Résumons ce qui a été montré. Puisque $E_2 > E_3$, A devrait publier ses étapes solitaires lorsqu'il reste une seule étape temporelle. Il devrait aussi publier ses étapes communes. Aussi, quel que soit le type d'étapes que A a passées, il devrait les publier s'il reste une seule étape temporelle : cela prouve l'initialisation de la récurrence pour le théorème 1. Supposons à présent qu'il a été prouvé pour un m quelconque inférieur à n que, lorsqu'il reste m intervalles temporels, A devrait publier chaque étape qu'il a franchies. Considérons A lorsqu'il reste $m+1$ étapes temporelles. Par hypothèse, A devrait publier au prochaine intervalle temporel, lorsqu'il restera seulement m étapes temporelles. Par conséquent, il se trouve dans le cas qui a été discuté préalablement, lorsqu'il reste un seul intervalle de temps avant la fin du jeu. En effet, l'hypothèse de la fin du jeu n'est rien d'autre que l'assurance que chacun publie et c'est le seul

[1]Pourquoi, à chaque fois que B réussit dans sa recherche, n'y a-t-il pas une telle différence de $v/2$, comme par exemple dans la cellule en haut à gauche ? Dans ce cas A réussit aussi, donc que A ait publié ou non ses a étapes auparavant, B avancera toujours sur une étape non-libre (que A a aussi franchie) et il n'y aura pas de différence.

[2]Noter que, en publiant, A évite de perdre $v/2$, mais permet à B d'obtenir v au lieu de $v/2$. Par conséquent, si A était intéressé non pas seulement par obtenir une grande récompense pour elle-même, mais aussi à ce que B obtienne une récompense faible, elle pourrait avoir intérêt à ne pas publier ici.

rôle que cela a joué dans la discussion ci-dessus[3]. Par conséquent, le théorème 1 a été prouvé par récurrence. Noter que la conclusion selon laquelle A devrait toujours publier a été montrée non seulement en moyenne, mais aussi pour chaque résultat possible de la recherche — à travers une comparaison des cellules correspondantes des tableaux 2 et 3.

2 Preuve du théorème 2 de la section 4.3

Deux stratégies ont été définies et j'ai montré à la section 4.3 du chapitre 6 que pour prouver le théorème 2, il suffit de prouver que la stratégie I est meilleure que la stratégie II. Comme à la section 1 de cette annexe, A ne sait pas de manière assurée si une étape est commune ou solitaire, donc la mise en œuvre de la stratégie II peut être remise en cause. Heureusement, je vais montrer que c'est la stratégie I qui devrait être suivie. De même, il sera évident au cours de la démonstration que des stratégies intermédiaires entre I et II ne feraient pas mieux que l'une des deux.

La chaîne se compose de l étapes, chacune valant la récompense v. Lorsque le jeu est terminé, la récompense totale lv a donc été distribuée aux scientifiques. À cause de leur rôle symétrique, les deux joueurs peuvent espérer une récompense $lv/2$ s'ils adoptent la même stratégie. S'ils adoptent des stratégies différentes, choisir la meilleure stratégie revient à comparer la récompense attendue avec la valeur moyenne $lv/2$. Je vais justifier que les récompenses attendues par les scientifiques sont données par le tableau 4.

$A \setminus B$	Stratégie I	Stratégie II
Stratégie I	$lv/2\,;\,lv/2$	$> lv/2\,;\,< lv/2$
Stratégie II	$< lv/2\,;\,> lv/2$	$lv/2\,;\,lv/2$

Tableau 4 – Récompenses attendues par A et B (respectivement), selon les stratégies qu'ils adoptent.

Passer de ce tableau 4 au théorème 2 — selon lequel un scientifique devrait adopter la stratégie I — ne sera pas difficile. Quelle que soit la stratégie que B adopte, A peut espérer une meilleure récompense si elle adopte la stratégie I. La même chose est vraie pour B. Par conséquent, les deux protagonistes devraient choisir la stratégie I, qui est un équilibre de Nash. On pourrait objecter qu'ils pourraient parvenir à un

[3]Si B ne publiait pas lorsqu'il reste n intervalles de temps, ce serait encore meilleur pour A. La preuve ci-dessus supposait que B publiait, donc traite du pire cas.

accord pour adopter ensemble la stratégie II, qui leur rapporte autant. Mais il y a de nombreuses raisons pour lesquelles ils n'ont pas intérêt à le faire. Tout d'abord, il n'y a pas d'avantage : la récompense moyenne est la même pour tous les deux, $lv/2$. Deuxièmement, un tel accord a l'inconvénient de ne pas être un équilibre de Nash : si un scientifique rompt l'accord, il augmente sa récompense aux dépends de son concurrent. Chacun devrait le redouter. Troisièmement, même si tous deux respectaient cet accord, il serait difficile de le mettre en place en pratique. La stratégie II repose sur le fait que les scientifiques distinguent entre les étapes communes et solitaires. Or par hypothèse un scientifique ne connaît pas le succès de son concurrent, donc ne peut pas distinguer entre les deux types d'étapes. S'il se trompe dans l'identification d'une étape, il peut perdre une certaine récompense potentielle. Ainsi, les agents ne devraient pas vouloir s'accorder sur la stratégie II[4]. La conclusion de cette discussion est que montrer le tableau 4 suffira à montrer le théorème 2.

Montrons à présent que ce tableau 4 est juste. Il est clair qu'il pourrait être dérivé de la proposition suivante $P(k)$, si celle-ci est vraie pour tout $k \in \mathbb{N}$:

> **Proposition** $P(k)$: Si B a adopté la stratégie I, si A a des étapes solitairse et s'il reste k étapes avant la fin de la chaîne (c'est-à-dire si A est à la position $l-k$), alors la récompense attendue de A est plus grande s'il publie ses étapes solitaires.

Je vais à présent prouver $P(k)$ par récurrence. Pour le cas initial, $k = 1$ et A est à l'étape $l-1$, juste avant la fin de la chaîne. Il a des étapes solitaires, par exemple a, ce qui signifie que B est à la position $l-1-a$. Toutes les étapes avant $l-1-a$ ont été publiées puisqu'elles sont communes. A se demande s'il devrait publier ses a étapes solitaires avant le prochain intervalle temporel. Considérons ce qui se passe si A publie ses a étapes. Elle obtient immédiatement une récompense av et les deux scientifiques sont maintenant sur l'étape $l-1$. À partir de la symétrie entre les positions de A et B, chacun a la même probabilité de franchir la dernière étape jusqu'à la fin du jeu, ce qui donne pour chacun une récompense attendue de $v/2$. En additionnant, la récompense attendue pour A dans ce cas est

$$E = av + \frac{v}{2}. \tag{3}$$

[4]Si on permet au scientifique B de faire des erreurs dans son application de la stratégie I, par exemple de ne pas publier une étape franchie, alors il peut être montré que la stratégie II peut être légèrement meilleure pour A que la stratégie I. A peut profiter de ces erreurs plus efficacement qu'avec la stratégie I. Mais pour cela, A a besoin de supposer que B fait de telles erreurs et il doit identifier exactement quand. S'il fait lui-même une erreur dans cette évaluation, c'est lui qui perd une certaine récompense potentielle.

Supposons maintenant que A ne publie pas ses a étapes maintenant. A et B commencent leur recherche, A étant à la position $l-1$ et B à la position $l-a-1$. Je vais construire un tableau (ci-dessous, le tableau 5) pour la récompense attendue de A à long terme, notée E_5, selon les résultats de la recherche après le prochain intervalle temporel. Notons qu'il s'agit de la récompense attendue pour A à partir de cette situation spécifique jusqu'à la fin du jeu, et non pas seulement pour le prochain intervalle temporel.

Voici comment le tableau 5 est rempli. Si A réussi, le jeu est terminé et les récompenses peuvent être facilement calculées : ou bien $(a+1)v$ si B ne réussit pas, ou bien $(a+1/2)v$ s'il réussit. Si A ne réussit pas, le jeu ne sera pas terminé, donc le calcul de la récompense n'est pas immédiat. Si A et B échouent tous les deux, ils restent à la même position pour le prochain intervalle temporel. La récompense attendue de A dans ce cas est donc simplement E_5 lui-même. Dans le cas où A échoue et B réussit, A se retrouve dans la position $l-1$ et B dans la position $l-a$, une étape plus haut. Appelons E'_5 la récompense attendue pour A dans cette situation. Quelle que soit l'évolution de la situation, A ne peut pas espérer publier plus de a étapes, donc $E'_5 < av$ en moyenne. Cela permet de remplir le tableau 5.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$(a+1/2)v$	$(a+1)v$
échec	E'_5	E_5

Tableau 5 – Récompense attendue E_5 pour A, lorsqu'il est à l'avant-dernière étape, a étapes devant B, et adopte la stratégie II.

Pour obtenir la récompense attendue E_5, je pondère ce tableau avec le tableau 1. Un peu de calcul permet de montrer que $E_5 < E$. Autrement dit, si A a des étapes solitaires et qu'il est à la position $l-1$, sa récompense attendue est plus grande s'il les publie maintenant que s'il ne le fait pas. Cela prouve $P(1)$.

Supposons maintenant que $P(k)$ a été montré pour un k quelconque. Pour le cas $k+1$, A est à l'étape $l-k-1$. Grâce à $P(k)$, il sait qu'il publiera ses étapes solitaires, s'il en a, lorsqu'il sera en l_k, c'est-à-dire à la prochaine étape. A et B publieraient tous deux s'ils atteignaient l'étape $l-k$ (B parce qu'il publie toujours). Cela suggère que cette étape l_k joue le rôle de la fin de la chaîne, que l'on est dans une situation où $P(1)$ s'applique, pour en conclure que A devrait publier maintenant à $l-k-1$. L'argument est presque valable. Il suppose implicitement que A devrait maximiser sa récompense lorsque quelqu'un arrive en $l-k$ (si cela doit jouer le rôle de la fin de la

chaîne). En réalité, le but véritable pour A est de maximiser sa récompense lorsque lui ou B atteint l'étape l, qui est la vraie fin de la chaîne. Heureusement, la seule façon de maximiser la récompense en l est de la maximiser tout d'abord en $l-k$: quelqu'un publiera en $l-k$, les deux scientifiques seront ensemble à cette étape, donc A n'a pas moyen de conserver une quelconque avance non-publiée pour la véritable fin de la chaîne. Par conséquent, l'argument employant $P(1)$ peut être employé et $P(k+1)$ peut être prouvé. Ainsi que je l'ai défendu auparavant, cela prouve le tableau 4 et le théorème 2.

3 Preuve du théorème 3 de la section 4.4.1

Dans la section 4.4.1, le théorème 3 est équivalent à énoncer que la stratégie III donne une meilleure récompense en moyenne que la stratégie I. Comme la récompense totale distribuée parmi les scientifiques est constante et vaut v_1+v_2, cela est équivalent à énoncer le tableau 6, qui compare les récompenses des scientifiques par rapport à la récompense médiane $(v_1+v_2)/2$.

$A \setminus B$	Stratégie I	Stratégie III
Stratégie I	$(v_1+v_2)/2\,;\,(v_1+v_2)/2$	$<(v_1+v_2)/2\,;\,>(v_1+v_2)/2$
Stratégie III	$>(v_1+v_2)/2\,;\,<(v_1+v_2)/2$	$(v_1+v_2)/2\,;\,(v_1+v_2)/2$

Tableau 6 – Récompenses attendues pour A et B (respectivement), selon les stratégies qu'ils adoptent.

Les cellules diagonales de ce tableau sont remplies avec la récompense médiane, à cause de la symétrie entre A et B lorsqu'ils adoptent la même stratégie. Les cellules non-diagonales expriment simplement l'exigence que la stratégie III est meilleure que la stratégie I (quelle que soit la stratégie adoptée par le concurrent). Je vais considérer la cellule en bas à gauche : A et B adoptent respectivement les stratégies III et I. Je vais calculer les récompenses attendues E_7 pour A et imposer l'exigence que $E_7 > (v_1+v_2)/2$ afin de trouver des conditions sur v_1 et v_2.

Je remplis à présent le tableau 7 qui indique la récompense attendue E_7 pour A, selon le résultat du premier intervalle temporel. Si A et B réussissent, seul B publie parce que A suit la stratégie III. Ils se retrouvent dans des positions symétriques vis-à-vis de la dernière étape : la récompense attendue de A est $v_2/2$. Si A échoue et B réussit, seul B publie, et la récompense attendue de A est $v_2/2$. Si les deux scientifiques échouent, ils restent dans la même position et la récompense attendue

est encore E_7. Si A réussit et B échoue, la récompense attendue de A est appelée E_8 et est calculée plus bas.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$v_2/2$	E_8
échec	$v_2/2$	E_7

Tableau 7 – Récompense attendue E_7 pour A, selon le résultat de la recherche durant le premier intervalle temporel.

E_7 se calcule en pondérant le tableau 7 avec le tableau 1 :

$$E_7 = p^2\frac{v_2}{2} + p(1-p)\frac{v_2}{2} + p(1-p)E_8 + (1-p)^2E_7 \tag{4}$$

Je me tourne à présent vers le calcul de E_8 (tableau 8) : A est à l'étape 1 et B à l'étape 0. Si les deux scientifiques réussissent, A publie les étapes 1 et 2 tandis que B publie l'étape 1 : la récompense de A est $v_1/2+v_2$. Si A réussit et B échoue, A obtient $v_1 + v_2$. Si A échoue et B réussit, B publie ; les deux scientifiques sont à l'étape 1, dans une position symétrique : la récompense attendue de A est alors de $v_2/2$. Si les deux scientifiques échouent, A attend toujours la récompense E_8.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$v_1/2 + v_2$	$v_1 + v_2$
échec	$v_2/2$	E_8

Tableau 8 – Récompense attendue E_8 pour A, lorsque A est à l'étape 1 et B à l'étape 0.

En pondérant le tableau 8 avec le tableau 1, on calcule

$$E_8 = p^2\Big(\frac{v_1}{2} + v_2\Big) + p(1-p)\Big(v_1 + v_2 + \frac{v_2}{2}\Big) + (1-p)^2E_8. \tag{5}$$

De là, on extrait E_8 :

$$E_8 = \frac{(2-p)v_1 + (3-p)v_2}{2(2-p)}. \tag{6}$$

Cela peut être utilisé dans l'éq. 4 afin d'obtenir

$$E_7 = \frac{v_2}{2(2-p)} + \frac{1-p}{2(2-p)^2}\big[(2-p)v_1 + (3-p)v_2\big] \tag{7}$$

La condition exprimée dans la cellule en bas à gauche du tableau 6 est que

$$E_7 > \frac{v_1 + v_2}{2}. \tag{8}$$

Avec l'éq. 7, elle mène à

$$v_2 > \frac{2-p}{1-p} v_1. \tag{9}$$

4 Preuve du théorème 4 de la section 4.4.2

La preuve du théorème 4 de la section 4.4.2 est très similaire à celle du théorème 3 dans la section précédente 3, et je vais seulement indiquer les différences essentielles ici. La récompense totale distribuée est $2v$, donc les récompenses attendues devraient être selon le tableau 9.

$A \setminus B$	Stratégie I	Stratégie III
Stratégie I	$v\,;\,v$	$<v\,;\,>v$
Stratégie III	$>v\,;\,<v$	$v\,;\,v$

Tableau 9 – Récompenses attendues pour A et B (respectivement), selon les stratégies qu'ils adoptent.

Le tableau 10 indique la récompense attendue de A, E_{10}, selon le résultat du premier intervalle.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$v/2$	E_{11}
échec	$v/2$	E_{10}

Tableau 10 – Récompense attendue E_{10} pour A, selon le résultat du premier intervalle temporel.

E_{10} se calcule en pondérant le tableau 10 avec le tableau 1 :

$$E_{10} = p_1 \frac{v}{2} + p_1(1-p_1)E_{11} + (1-p_1)^2 E_{10} \tag{10}$$

E_{11} se calcule à partir du tableau 11, en pondérant avec le tableau 12 :

$$E_{11} = \frac{p_1/2 + 2p_2 - p_1 p_2}{p_1 + p_2 - p_1 p_2} v. \tag{11}$$

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$v/2 + v$	$2v$
échec	$v/2$	E_{11}

Tableau 11 – Récompense attendue E_{11} pour A, lorsque A est à l'étape 1 et B à l'étape 0.

$A \setminus B$	succès	échec
succès	$p_1 p_2$	$p_2(1-p_1)$
échec	$p_1(1-p_2)$	$(1-p_1)(1-p_2)$

Tableau 12 – Probabilité des résultats de la recherche de A et B, lorsque A est à l'étape 1 et B à l'étape 0.

À partir des éq. 11 et 10, on obtient

$$E_{10} = \frac{v}{2(2-p_1)} + \frac{1-p_1}{2-p_1} \times \frac{p_1/2 + 2p_2 - p_1 p_2}{p_1 + p_2 - p_1 p_2} v \tag{12}$$

À partir des conditions exprimées dans la cellule en bas à gauche du tableau 9 ($E_{10} > v$), on obtient l'inégalité du théorème 4.

Bibliographie

Aaronson, S. (2007), blog : `http://scottaaronson.com/blog/?p=218`

Aharonov, Y., Albert, D. Z. et Vaidman L., (1988), « How the Result of a Measurement of a Component of a Spin 1/2 Particle Can Turn Out to Be 100 ? », *Physical Review Letters*, **60**, 1351-1354.

Aharonov, Y. et Vaidman, L. (1996) « About Position Measurements Which Do Not Show the Bohmian Particle Position », in J. T. Cushing, A. Fine *et al.*, *Bohmian Mechanics and Quantum Theory : an Appraisal*, p. 141-154, Kluwer.

— (2008), « The Two-State Vector Formalism, an Updated Review » in *Time in Quantum Mechanics*, Vol. 1, *Lectures Notes in Physics* 734 : 399-447.

Albert, D. Z. (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, MA et Londres : Harvard University Press.

— (2007), « Probability in the Everett Picture », présenté à la conférence « The Everett Interpretation of Quantum Mechanics : 50 years on », Oxford, 19-21 juillet 2007, manuscrit non publié.

Allori, V., Goldstein, S., Tumulka, R. et Zanghì, N. (2008), « On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber Theory », *British Journal for the Philosophy of Science*, 59 (3) : 353-389.

Aspect, A. (1976), « Proposed Experiment to Test the Nonseparability of Quantum Mechanics », *Physical Review D*, 14 (8), p. 1944-1951.

— (1999), « Bell's Inequality Test : more Ideal than Ever", *Nature*, Vol. 398, p. 189-190.

— (2002), « Bell's Theorem : the Naïve View of an Experimentalist », in R. A. Bertlmann et A. Zeilinger (éds.), *Quantum [Un]speakables — From Bell to Quantum Information*, Springer.

Aspect, A., Dalibard, J. et Roger, G. (1982), « Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analysers », *Physical Review Letters*, 49 (25), p. 1804–1807.

Aspect, A., Grangier, P. et Roger, G. (1981) « Experimental Test of Realistic

Local Theories via Bell's Theorem », *Physical Review Letters*, 47 (7), p. 460-463.

— (1982), « Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment : A New Violation of Bell's Inequalities », *Physical Review Letters*, 49 (2), p. 91-94.

Auletta, G. (2001), *Foundations and Interpretation of Quantum Mechanics*, Singapore : World Scientific.

Auletta, G., Fortunato, M. et Parisi, G. (2009), *Quantum Mechanics into a Modern Perspective*, Cambridge : Cambridge University Press.

Bacciagaluppi, G. (2008) « The Role of Decoherence in Quantum Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2009 Edition)*,
`http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/qm-decoherence/`

Ballentine, L. E. (1998), *Quantum Mechanics : a Modern Development*, Singapour : World Scientific Publishing.

Barrett, J. A. (2000), « The Persistence of Memory : Surreal Trajectories in Bohm's Theory », *Philosophy of Science*, Vol. 67, No. 4 (Dec. 2000), p. 680-703.

— (2011), « Everett's Relative-State Formulation of Quantum Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2011 Edition)*,
`http://plato.stanford.edu/archives/spr2011/entries/qm-everett/`

Bell, J. S. (1964a), « On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics », SLAC-PUB-0044, août 1964, p. 1-21. Re-publié avec des changements mineurs dans *Reviews of Modern Physics* **38** (1966) 447-452. Reproduit dans Bell (1987), p. 1-13.

— (1964b) « On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox », *Physics* **1**, 195-200. Reproduit dans Bell (1987), p. 14-21.

— (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge : Cambridge University Press.

— (1990), « Against 'Measurement' », *Physics World*, Août 1990, p. 33-40.

Beller, M. (1999), *Quantum Dialogue : the Making of a Revolution*, Chicago : University of Chicago Press.

Belousek, D. W. (2003), « Formalism, Ontology and Methodology in Bohmian Mechanics », *Foundations of Science*, **8** : 109-172.

Berthiaume, A. et Brassard, G. (1994), « Oracle Quantum Computing », *Journal of Modern Optics* **41** (12) (1994) 2521-2535. Des versions préliminaires ont été publiées dans *Proceedings of the Workshop on Physics and Computation* (1992), IEEE Press, p. 195-199 et *Proc. 7th IEEE Structure in Complexity*

Theory (1992), p. 132-137.

Bohm, D. (1952), « A Suggested Interpretation of Quantum Theory in terms of 'Hidden' Variables », *Physical Review*, 85 : 166–193.

Bohm, D. et Aharonov, Y. (1957), « Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Rosen, and Podolsky », *Physical Review*, **100** (4), p. 1070-1076.

Boyer, T. (2008), « Mécanique Quantique et Intégrale de Chemin : l'Interprétation Physique d'une Théorie Change-t-elle avec sa Formulation Mathématique ? », mémoire de Master 2, Université de Paris 1, manuscrit non publié, juin 2008.

Brassard, G. (2005), « Is Information the Key ? », *Nature Physics*, **1**, p. 2-4.

Bricmont, J. (1999), « What is the Meaning of the Wave Function ? », in J.-M. Frère, M. Henneaux, A. Sevrin, Ph. Spindel (éds.), *Fundamental Interactions : from Symmetries to Black Holes*, Conférence en l'honneur de François Englert, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, p. 53-67.

— (2002), « La Non-Localité et la Théorie de Bohm », B. d'Espagnat (éd.), *Implications Philosophiques de la Science Contemporaine. Tome 2.*, Collection : Cahiers Sciences Morales et Politiques, Paris : PUF. Disponible à `www.asmp.fr/travaux/gpw_philosc.htm`

— (2009), « La Mécanique Quantique pour Non-Physiciens », in J. Bricmont, H. Zwirn (éds.)*Philosophie de la Mécanique Quantique*, Paris : Vuibert.

Bridgman, P. W. (1927), *The Logic of Modern Physics*, New-York : Macmillan.

Bromberg, Joan Lisa (1991), *The Laser in America, 1950-1970*, MIT Press.

Bruckner, C. et Zeilinger, A. (2003), « Information and Fundamental Elements of the Structure of Quantum Theory », in L. Castell et O. Ischebeck (éds.), *Time, Quantum and Information*, p. 323-356, Springer-Verlag, arXiv : `quant-ph/0212084`

Bub, J. (2010), « Quantum Probabilities : An Information-Theoretic Interpretation », in Hartmann et C. Beisbart (éds.), *Probabilities in Physics*, Oxford : Oxford University Press.

Cao, T. Y. (1997), *Conceptual Developments of 20th Century Field Theories*, Cambridge University Press.

Carnap, R. (1956), « The Methodological Character of Theoretical Concepts », in H. Feigl et M. Scriven, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science. Vol. 1. The Foundations of Science and Concepts of Psychology and Psychoanalysis*, p. 38-76, Minneapolis : University of Minnesota Press.

— (1973), *Les Fondements Philosophiques de la Physique*, trad. fra. de J. M. Luccioni

et A. Soulez, Paris : Armand Colin. Édition originale : *Philosophical Foundations of Physics*, 1966, New-York : Basic Books.

Cat, J. (2010), « The Unity of Science », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/fall2010/entries/scientific-unity/`

Chappert, A. (2007), *Histoire de l'Optique Ondulatoire. De Fresnel à Maxwell*, Paris : Belin.

Chang, H. (2009), « Operationalism », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2010 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/fall2009/entries/operationalism/`

Clauser, J. F. (2002), Interview de John F. Clauser par Joan Lisa Bromberg le 20 mai 2002, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park MD, `http://www.aip.org/history/ohilist/25096.html`

Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A. et Holt, R. A. (1969), « Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories », *Physical Review Letters*, **23** (15), p. 880-883.

Clifton, R., Bub, J., et Halvorson, H. (2003), « Characterizing Quantum Theory in Terms of Information-Theoretic Constraints », *Foundations of Physics*, 33 (11) : 1561-1591 (2003). arXiv : `quant-ph/0211089v2`.

Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. et Laloë F. (1998), « Mécanique Quantique, Tome 1 », Paris : Hermann. Première édition 1973 ; édition revue et augmentée de 1998.

Collins, H. M. (1974), « The TEA Set : Tacit Knowledge and Scientific Networks », *Science Studies*, 4 (2) : 165-185.

Cushing, J. T. (1994), *Quantum Mechanics. Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*, Chicago : The University of Chicago Press.

Darrigol, O. (1992), *From c-Numbers to q-Numbers : The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, University of California Press.

— (2004), « Faut-il Réviser l'Histoire de la Relativité ? », extrait de la *Lettre de l'Académie des Sciences*, n°14 hiver 2004, p. 6-7. Disponible à : `www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/Generalites/Darrigol%20_amp.pdf` Repris dans le *Bulletin de la Société Française de Physique* (150), juillet-août 2005, p. 27-29 et dans le *Bulletin de l'Union des Physiciens* (2005), n°876, p. 689-697.

Deutsch, D. (1985), « Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Qomputer », *Proceedings of the Royal Society of London A*

400, p. 97-117.

— (1997), *The Fabric of Reality*, Londres : Penguin Books.

— (2003), « It from Qubit », in J. Barrow, P. Davies et C. Harper (éds.), *Science and Ultimate Reality*, Cambridge : Cambridge University Press.

— (2011), *The Beginning of Infinity*, Londres : Penguin Books.

Deutsch, D. et Jozsa, R. (1992), « Rapid Solution of Problems by Quantum Computation », *Proceedings of the Royal Society of London A* **439**, p. 553-558.

DeWitt, B. S. (1970), « Quantum Mechanics and Reality », *Physics Today*, Vol. 23, No. 9 (Septembre 1970), p. 30-35.

Dickson, M. et Dieks, D. (2009), « Modal Interpretations of Quantum Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2009 Edition)*,
`http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/qm-modal/`

Dieks, D. (2007), « Probability in Modal Interpretations of Quantum Mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **38** (2007) 292–310.

Dirac, P. A. M. (1930), *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford : Clarendon Press.

— (1963), « The Evolution of the Physicist's Picture of Nature », *Scientific American*, **208** (5), 1963, p. 45-53.

Dorato, M. (2007), « Dispositions, Relational Properties and the Quantum World », in M. Kistler et B. Gnassounou (éds.), *Dispositions and Causal Powers*, Ashgate, p. 249-269.

Dorato, M. et Esfeld, M. (2010), « GRW as an Ontology of Dispositions », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, (41) 4 :41-49.

Dubson, M., Goldhaber, S., Pollock, S. et Perkins, K. (2009), « Faculty Disagreement about the Teaching of Quantum Mechanics », *2009 Physics Education Research Conference Proceedings*, AIP.

Dürr, D., Goldstein, S. et Zanghì, N. (1992), « Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty », *Journal of Statistical Physics*, **67** : 843-907.

— (1997), « Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function », in R. S. Cohen, M. Horne et J. Stachel (éds.), *Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance — Quantum Mechanical Studies in Honor of Abner Shimony*, vol. 1, p. 25-38, Dordrecht : Kluwer. arXiv : `quant-ph/9512031`.

— (2009), « On the Weak Measurement of Velocity in Bohmian Mechanics », *Journal of Statistical Physics*, 134 : 1023-1032.

Dürr, D. et Teufel, S. (2009), *Bohmian Mechanics : The Physics and Mathematics*

of Quantum Theory, Springer.

Einstein, A. (1918), « Principles of Research », reproduit dans (1954), p. 224-227.

— (1919), « What is the Theory of Relativity ? », lettre au *London Times*, 28 novembre 1919, reproduit dans (1954), p. 227-232.

— (1954), *Ideas and Opinions*, New-York : Crown Publishers.

Einstein, A., Podolsky, B. et Rosen, N. (1935), « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete ? », *Physical Review* **47**, p. 777-780.

Everett, H. (1957), « 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics », *Reviews of Modern Physics*, 29 : 454–462.

Feynman, R. P. (1942), « The Principle of Least Action in Quantum Mechanics », thèse de l'Université de Princeton, NJ. Reproduit dans Feynman (2007), « Le Principe de Moindre Action en Mécanique Quantique », p. 1-63.

— (1948), « Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics », *Review of Modern Physics* **20**, 367-387. Reproduit dans Feynman (2007), « Approche Espace-Temps de la Mécanique Quantique Non-Relativiste », p. 63-101.

— (1965), « The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics », Conférence Nobel, disponible en ligne à `http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html` Reproduit *in* Feynman (1980), *La Nature de la Physique*, Seuil, coll. Points Sciences, p. 235-277.

— (2007), *La Thèse de Feynman, une Nouvelle Approche de la Théorie Quantique*, traduction française : É. Biémont, Paris : Pearson Education France (2007).

Freire, O. Jr. (1992), « Comment on 'The Crisis in Physics' », *Social Studies of Science*, Vol. 22, No. 4 (nov. 1992), p. 739-742.

— (2004), « The Historical Roots of 'Foundations of Quantum Physics' as a Field of Research (1950–1970) », *Foundations of Physics*, Vol. 34, No. 11, p. 1741-1760.

— (2005), « Science and Exile : David Bohm, the Cold War, and a New Interpretation of Quantum Mechanics », *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, Vol. 36, No. 1, sept. 2005, p. 1-34.

— (2006), « Philosophy Enters the Optics Laboratory : Bell's Theorem and its First Experimental Tests », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **37** (2006) 577–616.

— (2009), « Quantum Dissidents : Research on the Foundations of Quantum Theory circa 1970 », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **40** (2009) 280–289.

French, S. (2003), « A Model-Theoretic Account of Representation », *Philosophy of Science*, Vol. 70, No. 5 (déc. 2003), p. 1472-1483.

Frisch, M. (2005), « Mechanisms, Principles, and Lorentz's Cautious Realism », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **36** (2005) 659–679.

Fuchs, C. A. (2002), « Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more) », arXiv : `quant-ph/0205039v1`

— (2010), « QBism, the Perimeter of Quantum Bayesianism », arXiv : `quant-ph/1003.5209v1`

Fuchs, C. A., Gisin, N., Griffiths, R. B., Niu, C. S. et Peres, A. (1997), « Optimal Eavesdropping in Quantum Cryptography. I. Information Bound and Optimal Stratégie », *Physical Review A* (56), p. 1163–1172.

Fuchs, C. A. et Peres, A. (2000), « Quantum Mechanics Needs No 'Interpretation' », *Physics Today*, (53) Mars 2000, p. 70-71.

Ghirardi, G. C. (2007) « Collapse Theories », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-collapse/`

Ghirardi, G. C., Rimini, A. et Weber, T. (1985), « A Model for a Unified Quantum Description of Macroscopic and Microscopic Systems », in L. Accardi *et al.* (éds.) *Quantum Probability and Applications*, Berlin : Springer.

— (1986), « Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems », *Phys. Rev. D* 34, 470–491.

Goldman, A. (2009), « Systems-Oriented Social Epistemology », in T. Gendler and J. Hawthorne (éds.), *Oxford Studies in Epistemology*, vol. 3, Oxford : Oxford University Press, 2009, p. 189-214.

Goldstein, S. (2009), « Bohmian Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2009 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/qm-bohm/`

— (2010), « Bohmian Mechanics and Quantum Information », *Foundations of Physics*, 40 : 335-355.

Gottfried, K. et Yan, T.-M. (2003), *Quantum Mechanics : Fundamentals*, New-York : Springer-Verlag.

Grantham, T. A., (2004), « Conceptualizing the (Dis)unity of Science », *Philosophy of Science*, Vol. 71, No. 2 (Avril 2004), p. 133-155.

Griffiths, D. J. (2004), *Introduction to Quantum Mechanics*, seconde édition, Pearson Prentice Hall.

Griffiths, R. B. (2003), *Consistent Quantum Mechanics*, Cambridge University

Press.

Griffiths, R. B. et Niu, C.-S. (1996), « Semiclassical Fourier Transform for Quantum Computation », *Physical Review Letters*, 76 : 3328–3231.

— (1997), « Optimal Eavesdropping in Quantum Cryptography. II. A Quantum Circuit », *Physical Review A*, 56 : 1173–1176.

Grinbaum, A. (2007a), « Reconstruction of Quantum Theory », *British Journal of Philosophy of Science*, 58 : 387-408.

— (2007b), « Reconstructing Instead of Interpreting Quantum Theory », *Philosophy of Science*, 74 (5) : 761-774.

Hacking, I. (1999), *The Social Construction of What ?*, Cambridge (MA) et Londres : Harvard University Press.

Hardy, L. (2001), « Quantum Theory from Five Reasonable Axioms », arXiv : `quant-ph/0101012`

Hempel, C. G. (1958), « The Theoretician's Dilemma », in H. Feigl, M. Scriven et G. Maxwell (éds.), *Concepts, Theories, and the Mind-Body Problem. Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. 2*, Minneapolis : University of Minnesota Press.

— (1963), « Implications of Carnap's Work for the Philosophy of Science », in P. Schlipp (éd.), *The Philosophy of Rudolf Carnap*, La Salle IL : Open Court, p. 685-709.

Hilgevoord, J. et Uffink, J. (2011), « The Uncertainty Relation », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2011 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/spr2011/entries/qt-uncertainty/`

Hoyningen-Huene, P. (1989), *Die Wissenschaftsphilosophie Thomas S. Kuhns.*, Wiesbaden : Vieweg. Traduction anglaise de A. T. Levine, *Reconstructing Scientific Revolutions : Thomas S. Kuhn's Philosophy of Science*, Chicago : The University of Chicago Press, 1993.

Howard, D. (2004), « Who Invented the 'Copenhagen Interpretation' ? A Study in Mythology », *Philosophy of Science* 71 (5) : 669-682.

Hughes, R. I. G. (1989), *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge (MA) et Londres : Harvard University Press.

Humphreys, P. (2004), *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, New York : Oxford University Press.

Isham, C. J. (1995), *Lectures on Quantum Theory : Mathematical and Structural Foundations*, Londres : Imperial College Press.

Ismael, J. T. (2009), « Quantum Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford*

Encyclopedia of Philosophy (Fall 2009 Edition),
http://plato.stanford.edu/archives/fall2009/entries/qm/

Jammer, M. (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill.

Jozsa, R. (2004), « Illustrating the Concept of Quantum Information », *IBM Journal of Research and Development*, 48 (1), janvier 2004, p. 79-85.

Kaiser, D. (2005), *Drawing Theories Apart : The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, The University of Chicago Press.

Kellert, S. H., Longino, H. E. et Waters, C. K. (éds.) (2006), *Scientific Pluralism*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. xix, Minneapolis (MN) et Londres : University of Minnesota Press.

Kitcher, P. (1990), « The Division of Cognitive Labor », *Journal of Philosophy*, Vol. 87, No. 1, (janvier 1990), p. 5-22.

— (1993), *The Advancement of Science : Science without Legend, Objectivity without Illusions*, Oxford : Oxford University Press.

Kocsis, S., Braverman, B., Ravets, S., Stevens, M. J., Mirin, R. P., Shalm, L. K. et Steinberg, A. M. (2011), « Observing the Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer », *Science*, Vol. 332, 3 juin 2011, p. 1170-1173.

Kragh, H. (2000), « Max Planck : the Reluctant Revolutionary", *Physics World*, 13 (12), décembre 2000, p. 31-36.
http://physicsworld.com/cws/article/print/373

Krips, H. (2008), « Measurement in Quantum Theory », in E. N. Zalta (éd.),*The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*,
http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qt-measurement/

Kuhn, T. S. (1962/1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago : The University of Chicago Press, 1962. Seconde édition 1970, augmentée d'une postface. Édition consultée : traduction française de L. Meyer, *La Structure des Révolutions Scientifiques*, coll. Champs, Paris : Flammarion, 1983.

— (1977), *The Essential Tension : Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago : The University of Chicago Press. Édition consultée : traduction française de M. Biezunski, P. Jacob, A. Lyotard-May et G. Voyat, *La Tension Essentielle : Tradition et Changement dans les Sciences*, Paris : Gallimard, 1990.

— (1978), *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Oxford : Oxford University Press. Édition consultée : 1987, Chicago : The University of Chicago Press.

— (2000), *The Road since Structure*, édité par J. Conant et J. Haugeland, Chicago

et Londres : The University of Chicago Press.

Landau, L. et Liftchitz, E. (1975), *Mécanique Quantique*, coll. « Physique Théorique », tome 3, Moscou : Mir. Traduit du russe par É. Gloukhian.

Le Bihan, S. (2006), « La Conception Sémantique des Théories Scientifiques, I », *Matière Première*, 1.

Levi, I. (1980), *The Enterprise of Knowledge : An Essay on Knowledge, Credal Probability, and Chance*, MIT Press.

— (1997), *The Covenant of Reason : Rationality and the Commitments of Thought*, Cambridge : Cambridge University Press.

Lévy-Leblond, J.-M. et Balibar, F. (1984), *Quantique : Rudiments*, Paris : Inter-Éditions.

Locqueneux, R. (2009), *Une Histoire des Idées en Physique*, coll. Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, Paris : Vuibert.

Lombardi, O. et Castagnino, M. (2008), « A Modal-Hamiltonian Interpretation of Quantum Mechanics », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **39**, p. 380-443.

Lundeen, J. S., Sutherland, B., Patel, A., Stewart, C. et Bamber, C. (2011), « Direct Measurement of the Quantum Wavefunction », *Nature*, Vol. 474, 9 juin 2011, p. 188-191.

Maxwell, J. C. (1878), « The Telephone », *Nature* (15). Reproduit dans Niven (éd.) (1890), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol 2.

Masterman, M. (1970), « The Nature of a Paradigm », in I. Lakatos et A. Musgrave, *Criticism and the Growth of Knowledge : Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London, 1965, volume 4*, Cambridge : Cambridge University Press, p. 59-89.

Mermin, N. D. (1985), « Is the Moon There When Nobody Looks ? Reality and the Quantum Theory », *Physics Today*, avril 1985, p. 38-47.

— (2003), « Copenhagen Computation », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **34** (2003) 511–522.

Moulines, C. U. (2006), *La Philosophie des Sciences. L'Invention d'une Discipline (fin* xixe*-début* xxie *siècle)*, Paris : Éditions Rue d'Ulm.

Mirowski P. et Sklivas, S. (1991), « Why Econometricians Don't Replicate (Although they Do Reproduce) », *Review of Political Economy*, 3.2, p. 146-163.

Nagel, E. (1945), « Book Review — *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, H. Reichenbach », *The Journal of Philosophy*, 42 (16), 2 août 1945, p. 437-444.

— (1961), *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, London : Routledge & Kegan.

North, J. (2009), « The 'Structure' of Physics : A Case-Study », *The Journal of Philosophy*, Vol. 151, No. 2, février 2009, p. 57-88.

Omnès, R. (1994), *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton : Princeton University Press.

Pais, A. (1982), *Subtle is the Lord : The Science and the Life of Albert Einstein*, New York : Oxford University Press.

Peres, A. (1993), *Quantum Theory : Concepts and Methods*, Kluwer Academic Publishers.

Price, D. de Solla (1961), *Science since Babylon*, New Haven et Londres : Yale University Press. Édition consultée : seconde édition augmentée (1971).

Putnam, H. (1962), « What Theories are Not », in Nagel, E., Suppes, P. et Tarski, A. (éds.), *Logic, Methodology, and Philosophy of Science : Proceedings of the 1960 International Congress*, p. 240-251, Stanford CA : Stanford University Press.

Redhead, M. (1987), *Incompletness, Non-Locality and Realism : A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, New-York : Oxford University Press.

Rovelli, C. (1996), « Relational Quantum Mechanics », *International Journal of Theoretical Physics*, 35 : 1637-1678, arXiv : `quant-ph/9609002v2`

Saunders, S. (2005), « Complementarity and Scientific Rationality », *Foundations of Physics*, **35**, 347-372.

Schrödinger, E. (1935), « Die gengenwärtige Situation in der Quantenmechanik », *Naturwissenschaften*, 23 : 807-812, 823-828 et 844-849. Traduit en anglais par J. D. Trimmer, in Wheeler et Zurek (éds.) (1983), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, NJ : Princeton University Press, p. 152-167.

Schulman, L. S. (1981), *Techniques and Applications of Path Integration*, John Wiley & Sons.

Schweber, S. S. (1994), *QED and the Men Who Made It : Dyson, Feynman, Schwinger, Tomonaga*, Princeton, NJ : Princeton University Press.

Sellars, W. (1962), « Philosophy and the Scientific Image of Man », in R. Colodny (éd.), *Frontiers of Science and Philosophy*, Pittsburgh : University of Pittsburgh Press, p. 35-78. Reproduit dans Sellars, W. (1963), *Science, Perception and Reality*, Londres : Routledge & Kegan Paul et New-York : The Humanities Press.

Shankar, R. (1994), *Principles of Quantum Mechanics*, seconde édition, New York : Plenum Press.

Shimony, A. (2002), Interview d'Abner Shimony par Joan Lisa Bromberg le 9 septembre 2002, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park MD, `http://www.aip.org/history/ohilist/25643.html`

— (2009), « Bell's Theorem », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2009 Edition)*, `http://plato.stanford.edu/archives/sum2009/entries/bell-theorem/`

Shor, P. W. (1994), « Algorithms for Quantum Computation, Discrete Logarithms and Factoring », *Proc. 35th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE Computer Society Press, Santa Fe NM, p. 124-134.

— (1997), « Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer », *SIAM J. Computing* **26** (5) (1997), p. 1484-1509. Reproduit dans (1999) *SIAM Review* **41** (2), p. 303-332.

Simon, D. R. (1994), « On the Power of Quantum Computation », *Proc. 35th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, IEEE Computer Society Press, Santa Fe NM, p. 116-123. Reproduit dans *SIAM J. on Computing* **26** (5) (1997), 1474-1483.

Slater, J. C. et Frank, N. H. (1947), *Electromagnetism*, Mc-Graw-Hill. Édition consultée : Courier Dover Publications, réédition (1969).

Smolin, L. (2006), *The Trouble with Physics*, Houghton Mifflin Harcourt.

Strevens, M. (2003a), « The Role of the Priority Rule in Science », *Journal of Philosophy*, 100 : 55–79.

— (2003b), « Further Properties of the Priority Rule », brouillon de juillet 2003, non publié.

— (2006), « The Role of the Matthew Effect in Science », *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 37, p. 159-173.

Suárez, M. (2007), « Quantum Propensities », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **38** : 418–438.

Suppe, F. (1977), « Introduction — The Search for Philosophical Understanding of Scientific Theories », in F. Suppe (éd.), *The Structure of Scientific Theories* [1974], University of Illinois Press, seconde édition 1977 (avec une introduction critique et une postface de F. Suppe), p. 1-241.

Tame, M. S., Prevedel, R., Paternostro, M., Böhi, P., Kim, M. S. et Zeilinger, A., « Experimental Realization of Deutsch's Algorithm in a One-Way Quantum Computer », *Physical Review Letter* **98**, 140501.

Tegmark, M. (1998), « The Interpretation of Quantum Mechanics : Many Worlds or Many Words ? », *Fortschritte der Physik* **46** (1998), Vol. 6-8, p. 855-862, arXiv :

quant-ph/9709032

Vaidman, L. (1998), « On Schizophrenic Experiences of the Neutron or Why We should Believe in the Many-Worlds Interpretation of Quantum Theory », *International Studies in the Philosophy of Science* (12), p. 245-261.

— (2008), « Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics », in E. N. Zalta (éd.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2008 Edition)*, http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/qm-manyworlds/

van der Waerden, B. L. (1973), « From Matrix Mechanics and Wave Mechanics to Unified Quantum Mechanics », in J. Mehra (éd.) (1973), *The Physicist's Conception of Nature*, Dordrecht, Pays-Bas : D. Reidel Publishing Company, p. 276-293.

van Fraassen, B. C. (1970), « On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories », *Philosophy of Science*, Vol. 37, No. 3 (sept. 1970), p. 325-339.

— (1972), « A Formal Approach to the Philosophy of Science », in R. Colodny (éd.), *Paradigms and Paradoxes : The Philosophical Challenge of the Quantum Domain*, Pittsburgh : University of Pittsburgh Press, p. 303-366.

— (1976), « To Save the Phenomena », *Journal of Philosophy*, **73**, p. 623-632. Traduction française par G. Garreta, in S. Laugier et P. Wagner (éds.), *Philosophie des sciences* ii, 2004, Paris : Vrin, p. 147-163.

— (1980), *The Scientific Image*, New York : Oxford University Press.

— (1991), *Quantum Mechanics. An Empiricist View*, New York : Oxford University Press.

— (2002), *The Empirical Stance*, Yale University Press.

von Neumann, J. (1955), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton, NJ : Princeton University Press. Première publication en allemand en 1932 : *Mathematisch Grundlagen der Quantenmechanik*, Berlin : Springer.

Vorms, M. (2009), « Théories, Modes d'Emploi. Une Perspective Cognitive sur l'Activité Théorique dans les Sciences Empiriques », thèse de l'Université de Paris 1, manuscrit non publié.

Wallace, D. (2008), « The Quantum Measurement Problem : State of Play », in D. Rickles (éd.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*, Aldershot : Ashgate Publishing, p. 16-98, arXiv : quant-ph/0712.0149v1.

Weisberg, M. et Muldoon, R. (2009), « Epistemic Landscapes and the Division of Cognitive Labor », *Philosophy of Science*, 76 (avril 2009), p. 225–252.

— (accepté), « Robustness and Idealization in Models of Cognitive Labor », *Synthese*. doi:10.1007/s11229-010-9757-8

WIGNER, E. P. (1961), « Remarks on the Mind-Body Question », in I. J. Good (éd.), *The Scientist Speculates*, p. 284-302, Londres : Heinemann.

WISEMAN, H. M. (2007), « Grounding Bohmian Mechanics in Weak Values and Bayesianism », *New Journal of Physics*, **9** (2007) 165.

WISEMAN, H. M. (2011), page personnelle, mars 2011, `www.ict.griffith.edu.au/wiseman/Themes.html`

ZAMORA BONILLA, J. P. (accepté), « The Economics of Scientific Knowledge », in U. Mäki (éd.), *Handbook of the Philosophy of Science. The Philosophy of Economics*, Elsevier.

ZEILINGER, A. (1996), « On the Interpretation and Philosophical Foundation of Quantum Mechanics », in U. Ketvel *et al.* (éds.), *Vastakohtien todellisuus*, Helsinki University Press.

— (1999), « A Foundational Principle for Quantum Mechanics », *Foundations of Physics*, **29** (4) p. 631-643.

ZOLLMAN, Kevin J. S. (2007), « The Communication Structure of Epistemic Communities », *Philosophy of Science* 74(5) : 574-587.

— (2008), « Social Structure and the Effects of Conformity », *Synthese*, 172 (3) : 317-340.

— (2009), « Optimal Publishing Strategies », *Episteme : The Journal of Social Epistemology*, 6 (2) : 185-199.

— (2010), « The Epistemic Benefit of Transient Diversity », *Erkenntnis*, 72 (1) : 17–35.

Index des noms propres

Aspect, A., 136, 159, 203, 218

Bell, J. S., 33, 52, 72, 132–136, 159, 174
Beller, M., 167, 176, 178, 194, 195
Bohm, D., 42, 61, 109, 134, 139, 158, 159, 203
Bohr, N., 10, 41–44, 57–60, 134, 158, 177

de Broglie, L., 42, 61, 177
Deutsch, D., 143, 144, 148, 152, 154, 156, 160, 179, 197

Einstein, A., 10, 33, 36, 41, 133, 134, 158, 177, 217
Everett, H., 42, 67, 109

Feynman, R. P., 140, 243, 244, 246

Griffiths, R. B., 148, 157, 160, 161

Heisenberg, W., 41, 42, 44, 57, 59, 110, 177, 243, 244, 246
Hughes, R. I. G., 27, 34, 112, 117–119

Jozsa, R., 139, 140, 148, 156, 160

Kitcher, P., 129, 149, 167, 169, 215, 222, 239
Kuhn, T. S., 12, 166, 194

Nagel, E., 30, 106

Planck, M., 217, 218

Schrödinger, E., 41, 53, 177, 243, 244, 246
Schwinger, J. S., 243, 244, 246
Sellars, W., 27, 32–34
Shor, P. W., 148, 151, 154, 201
Simon, D. R., 148, 156, 200, 201

Tomonaga, S.-I., 243, 244, 246

van Fraassen, B. C., 26, 33, 104, 112, 113, 116, 117, 173

Liste des figures

1.1 Plan de Fano 22

3.1 Un exemple de trajectoire de phase en mécanique classique 115
3.2 Schéma de l'analyse des théories scientifiques par la conception sémantique 117

5.1 Un exemple d'une chaîne de travaux féconds dans le domaine du calcul quantique 202

6.1 La chaîne d'étapes intermédiaires qui compose le domaine de recherche. 223

7.1 La chaîne d'étapes intermédiaires qui compose le domaine de recherche. 240

Liste des tableaux

2.1 Synthèse de caractéristiques des interprétations orthodoxe, bohmienne et everettienne 73

1 Probabilité des résultats de la recherche dans une chaîne homogène . 258
2 Dans l'hypothèse de temps fini, récompense pour A pendant le dernier intervalle temporel, lorsque A et B partent de la même étape 258
3 Dans l'hypothèse de temps fini, récompense pour A pendant le dernier intervalle temporel, lorsque A commence a étapes devant B 259
4 Récompenses attendues dans une chaîne finie, selon les stratégies adoptées 260
5 Dans l'hypothèse de chaîne finie, récompense E_5 pour A, lorsqu'il est à l'avant-dernière étape, a étapes devant B, et adopte la stratégie II . 262
6 Récompenses attendues dans une chaîne de récompense inhomogène, selon les stratégies adoptées 263
7 Dans une chaîne de récompense inhomogène, récompense attendue E_7 pour A 264
8 Dans une chaîne de récompense inhomogène, récompense attendue E_8 pour A, lorsqu'il est à l'étape 1 et B à l'étape 0 264
9 Récompenses attendues dans une chaîne de difficulté inhomogène, selon les stratégies adoptées 265
10 Dans une chaîne de récompense inhomogène, récompense attendue E_{10} pour A 265
11 Dans une chaîne de récompense inhomogène, récompense attendue E_{11} pour A, lorsqu'il est à l'étape 1 et B à l'étape 0 266
12 Probabilité des résultats de la recherche dans une chaîne de difficulté inhomogène 266

La pluralité des interprétations d'une théorie scientifique : le cas de la mécanique quantique

Résumé : Certaines théories scientifiques admettent plusieurs interprétations, c'est-à-dire qu'elles sont compatibles avec plusieurs images du monde. J'étudie ici le cas de la mécanique quantique contemporaine comme exemple d'une théorie admettant des interprétations variées. Parmi les interprétations les plus célèbres de la mécanique quantique, on peut citer l'interprétation orthodoxe de Copenhague, celle de la mécanique de Bohm ou celle des mondes multiples d'Everett. Actuellement, il n'existe pas de consensus vis-à-vis de l'interprétation correcte de la mécanique quantique, que ce soit parmi les physiciens ou parmi les philosophes.
Cette thèse étudie les enjeux liés à l'existence d'une telle pluralité d'interprétations, à travers plusieurs points de vue méthodologiques. Le premier s'attache à analyser formellement ce que sont les interprétations quantiques et en quel sens ce sont les interprétations d'une *même* théorie, c'est-à-dire qu'elles restent empiriquement équivalentes. Dans une deuxième partie, je m'intéresse aux rôles que jouent les diverses interprétations quantiques dans la pratique scientifique. J'étudie l'unité qui prévaut dans la recherche en mécanique quantique, en dépit de la diversité des interprétations utilisées. Je propose une notion d'unité fondée sur la réutilisation des travaux scientifiques, lorsque des interprétations différentes sont employées. Dans une troisième partie, je me penche sur les aspects normatifs de la pluralité d'interprétations. Je cherche à savoir sous quelles conditions une telle pluralité peut être bonne pour le fonctionnement de la recherche et le progrès épistémique. Je propose pour cela un modèle de théorie des jeux.

The plurality of interpretations of a scientific theory: the case of quantum mechanics

Abstract: Some scientific theories admit several interpretations, i. e. they are compatible with several images of the world. Here, I study the case of contemporary quantum mechanics as an example of a theory which admits varied interpretations. Among the most famous interpretations of quantum mechanics are the orthodox Copenhagen interpretation, Bohmian Mechanics, and Everett's many-worlds interpretation. There is presently no consensus *vis-à-vis* the right interpretation of quantum mechanics, whether it is among physicists or among philosophers.
This thesis studies the stakes of such a plurality of interpretations, through several methodological viewpoints. The first one proposes a formal analysis of what quantum interpretations are and in which sense they are interpretations of the *same* theory, i. e. remain empirically equivalent. In a second part, I study the roles played by quantum interpretations in scientific practice. I study the unity in quantum research, in spite of the diversity of the quantum interpretations which are used. I propose a concept of unity based on the reuse of scientific works, when different interpretations are adopted. In a third part, I look at the normative aspects of the plurality of interpretations. I investigate under which conditions a plurality of interpretations can be good for research work and for epistemic progress. To this end, I propose a game-theoretic model.

Mots clés : Philosophie générale des sciences, théorie scientifique, interprétation d'une théorie, philosophie de la mécanique quantique, unité de la science, épistémologie sociale, théorie des jeux.

Discipline : Philosophie

Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 12 place du Panthéon, 75005 Paris.
UFR de Philosophie, 17 rue de la Sorbonne, 75005 Paris.
École Doctorale de Philosophie (ED 280), 1 rue d'Ulm, 75005 Paris.
Équipe d'accueil : Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques (UMR 8590), 13 rue du Four, 75006 Paris.