

2m 11.3278.7

Université de Montréal

**Interprétation de la mécanique quantique
selon David Albert**

par

Éric Ouellet

Département de philosophie

116 15594

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès arts (M.A.)
en philosophie

Décembre 2004



B

29

U54

2005

V.009

Direction des bibliothèques

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé

**Interprétation de la mécanique quantique
selon David Albert**

présenté par

Éric Ouellet

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

*m. François Lepage, président rapporteur
m. Yvon Gauthier, directeur de recherche
m. Daniel Laugier, membre*

Sommaire

Si le formalisme de la mécanique quantique (MQ) a été rapidement établi au début des années 30, il en va tout autrement de l'interprétation de cette théorie physique. Ce mémoire de maîtrise vise à rendre compte des diverses interprétations qui ont été attribuées à la MQ, en particulier celle proposée par David Albert à la fin des années 80. Il est à noter, par ailleurs, que nous accordons dans ce mémoire une place importante aux interprétations fondamentales, soit celle défendue par Bohr et Heisenberg d'une part et, d'autre part, celle soutenue par Einstein, qui constituent les fondements essentiels de tout le débat portant sur l'interprétation de la MQ.

Nous présentons dans le premier chapitre une histoire très sommaire des principaux travaux qui ont mené à la formulation de la MQ. Le but essentiel de ce chapitre est de montrer la façon dont s'est opérée la rupture radicale entre, d'une part, le mode de pensée traditionnel en physique, soit l'approche développée selon la mécanique classique, et, d'autre part, la nouvelle approche, soit celle développée en fonction de la mécanique quantique. Dans le deuxième chapitre de notre mémoire, nous abordons l'aspect philosophique de la MQ, plus précisément par le biais de tout le débat portant sur son interprétation. Dans la première section, nous décrivons les interprétations de la MQ considérées comme les plus fondamentales, soit celle formulée par Bohr et Heisenberg, l'interprétation de Copenhague, et celle qui s'y oppose et qui est soutenue par Einstein. Enfin, nous rendons compte finalement de l'interprétation formulée par David Albert, soit l'interprétation des multiconsciences (*Many-Minds View*). Cette interprétation vise essentiellement à résoudre les problèmes soulevés par la théorie proposée par Hugh Everett, la théorie des multivers. Nos recherches montrent que si Albert a réussi à adopter comme seul et unique postulat l'équation fondamentale de Schrödinger, il n'en demeure pas moins que son interprétation soulève d'importants problèmes, notamment aux niveaux des probabilités et de l'obtention par l'observateur d'un résultat de mesure défini.

Mots clés : Philosophie - Philosophie et histoire des sciences – Physique – Mécanique quantique

Summary

The mathematical apparatus or the abstract formalism of quantum mechanics has been firmly established in the early 30s. However the interpretation of this formalism has been the most controversial problem of the foundation of this theory. We want to study here the interpretation problem and present some of the most important theories on this subject, more precisely the interpretation of David Albert at the end of the 80s.

In the first chapter, we present a short story of the essential works on quantum mechanics. Our main purpose in this first chapter is to study how this theory called for a drastic revision of the foundations of traditional physics. In the second and last chapter, we are interested at the philosophical aspects of quantum mechanics. We first look at fundamental interpretations like the Copenhagen Interpretation developed by Werner Heisenberg and Niels Bohr and, also, the opposite school of thought exposed by Einstein. Finally, we present the interpretation of David Albert, the Many-Minds View, which is based on the theory of Hugh Everett, the Many-Worlds Interpretation. The main result of our research shows that, although the interpretation of Albert solves many problems of Everett's theory, other problems remain unsolved such as probabilities and the way one gets a definite result from measurement.

Key Words : Philosophy – Philosophy and history of sciences – Physics – Quantum Mechanics

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	iii
Table des matières	vi
Remerciements	vii
Introduction	1
1. Développement historique de la MQ	3
1.1. Kirchhoff, Planck & Einstein : les <i>quanta</i>	3
1.2. Bohr & Sommerfeld : l'atome d'hydrogène	8
1.3. Heisenberg, Born & Jordan : mécanique matricielle	15
1.4. De Broglie, Schrödinger & Born : mécanique ondulatoire	19
2. Développement philosophique de la MQ	23
2.1 Interprétations fondamentales	23
2.1.1. Bohr & Heisenberg : interprétation de Copenhague	23
<i>Heisenberg : relations d'indétermination</i>	
<i>Bohr : principe de complémentarité</i>	
2.1.2. Einstein : inconsistance et incomplétude de la MQ	40
<i>Inconsistance : invalidité des relations d'indétermination</i>	
<i>Incomplétude : paradoxe EPR</i>	
2.2 Interprétation de David Albert	52
2.2.1. Von Neumann : la théorie de la mesure et le postulat de projection	52
2.2.2. Everett, De Witt, Graham & Wheeler : interprétation des multivers	54
2.2.3. Albert : interprétation des multiconsciences	58
Conclusion	62
Bibliographie	64

Remerciements

Merci à Professeur Yvon Gauthier, qui m'a initié à l'approche fondationnelle et critique en physique théorique.

Introduction

La mécanique quantique, avec la théorie de la relativité, représente sans aucun doute l'une des théories les plus importantes de la physique du XXe siècle. En histoire des sciences, on se réfère souvent à cette théorie pour illustrer de façon éloquente la transition entre deux modes de pensée scientifiques différents. Par ailleurs, la mécanique quantique a donné lieu à des débats entre les plus brillants et les plus fins esprits du XXe siècle. On se réfère ici, évidemment, au débat entre Niels Bohr et Albert Einstein. Mais aujourd'hui, dans la plupart des départements de physique, ceci n'est plus que de l'histoire ancienne. Dommage.

Dans ce mémoire de maîtrise, nous nous proposons d'abord, dans le premier chapitre, d'effectuer une étude à caractère historique de la MQ. Nous nous référons principalement à deux périodes. La première, qui s'étend approximativement de 1859 à 1925, correspond essentiellement à la formulation de l'hypothèse de Max Planck, soit l'hypothèse de la quantification de l'énergie, qui a permis l'émergence de cette nouvelle théorie en physique contemporaine. Dans cette même période, le concept fondamental de *quanta* de lumière ou de *photon* est élaboré par Einstein au début du siècle. Quant à la deuxième période, approximativement de 1925 jusqu'au début des années 30, elle correspond à l'établissement du formalisme de la MQ. Nous nous référons alors à un appareil logico-mathématique complètement différent par rapport à celui de l'approche traditionnelle développée selon la mécanique classique¹.

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous nous concentrons sur l'aspect philosophique de la MQ en étudiant ses diverses interprétations. Notre attention se porte tout d'abord sur les interprétations fondamentales. Nous accordons à celles-ci une place importante dans notre mémoire, car, à notre avis, elles constituent les fondements importants du débat. Finalement, nous rendons

¹ Nous tenons à faire quelques précisions à propos du formalisme. Tout d'abord, dans ce mémoire de philosophie, il n'y a pas lieu de présenter quelque équation que ce soit. Pour cela, on peut se référer à tout bon manuel de physique. Ensuite, dans ce mémoire, nous nous référons souvent à des expériences de pensée dont la description peut être très technique. Nous nous en sommes donc tenu à présenter l'essentiel. Mais, dans les ouvrages que nous citons, il y a parfois des figures, qui aident beaucoup à la compréhension de ces expériences de pensée. Enfin, nous tenons à faire quelques précisions linguistiques; nous avons parfois la fâcheuse habitude d'utiliser le terme *momentum*, terme bien sûr anglais pour désigner l'*impulsion* ou la *quantité de mouvement*. De même, nous utilisons l'expression *momentum angulaire* pour désigner le *moment cinétique*. Nous demandons à cet égard l'indulgence du lecteur.

compte d'une interprétation particulière de la MQ formulée à la fin des années 80 par David Albert. Après en avoir fait la description, nous soumettons cette interprétation à la critique en relevant d'abord ses avantages et, ensuite, ses inconvénients.

Chapitre 1

Développement historique de la mécanique quantique

Avant de jeter un regard philosophique sur la MQ en examinant ses principales interprétations, nous voulons en faire un survol historique. L'objectif essentiel de ce premier chapitre de notre mémoire est de décrire l'évolution des concepts principaux d'une théorie qui a profondément modifié la physique. Nous insisterons en particulier sur la façon dont s'est opérée la rupture radicale entre l'approche classique et l'approche quantique.

Nous effectuerons notre survol historique en quatre étapes. Les deux premières étapes concernent la première période de la MQ, que l'on nomme traditionnellement « l'ancienne » MQ. Tout d'abord (cf. §1.1), nous expliquerons comment s'est développé le concept de *quantum*, défini principalement par Max Planck et Albert Einstein. Nous décrirons ensuite (cf. §1.2) la façon dont Niels Bohr et Arnold Sommerfeld ont repris ce concept, en l'appliquant notamment à la structure de l'atome d'hydrogène. Après avoir constaté leur échec, qui a ainsi mis un terme à l'ancienne MQ, nous passerons aux deux dernières étapes, qui ont trait à la nouvelle MQ. Nous verrons essentiellement les outils d'analyse développés d'abord par Werner Heisenberg (cf. §1.3) et, ensuite, par Erwin Schrödinger et Max Born (cf. §1.4), qui ont défini l'approche quantique et qui représentent, comme on le verra, une rupture radicale avec l'approche classique.

1.1. Kirchhoff, Planck & Einstein : les quanta

La grande et révolutionnaire « aventure quantique » a commencé lorsque Gustav Kirchhoff écrivait en 1859 dans son article « On the relation between emission and absorption of light and heat » :

A few weeks ago I had the honor of addressing the Academy with a memoir on some observations which seemed to me most interesting as they allow drawing conclusions on the chemical constitution of the solar atmosphere. Starting from these observations I have now derived, on the basis of rather simple theoretical considerations, a *general theorem* which, in view of its great importance, I allow myself to present to the Academy. *It deals with a property of all bodies and refers to the emission and absorption of heat and light.* (Kirchhoff in Jammer 1989 : 2).

Ce dont il est question en général, dans l'article de Kirchhoff, est l'étude de la radiation thermique émanant d'une étoile, le Soleil. À partir des lois de la thermodynamique, Kirchhoff a formulé un principe, évoqué dans la citation ci-dessus et connu sous le nom de la *loi de Kirchhoff*, selon lequel le rapport entre l'émission et l'absorption d'un rayonnement de fréquence donnée est le même pour tous les corps, et ce, peu importe leur composition matérielle. Soulignons que Kirchhoff a obtenu ce principe à partir d'un *<gedankenexperiment>*, une expérience de pensée dans laquelle il décrit l'échange de rayonnement entre deux plaques de longueur infinie situées l'une en face de l'autre, composées de matériel différent et recouvertes d'une substance réfléchissante idéale de sorte qu'il n'y ait aucune perte dans le processus d'échange de radiation.

Après avoir formulé ce principe, Kirchhoff poursuit sa réflexion sur la base d'une autre représentation de la pensée, le corps noir. Un corps noir absorbe tout rayonnement incident. On peut se représenter un corps noir comme étant en quelque sorte une sphère creuse sur la paroi de laquelle il y a un petit trou. Ce petit trou correspond au corps noir dans la mesure où il absorbe tout le rayonnement incident. Maintenant, si l'on applique la loi de Kirchhoff au corps noir, le rapport entre l'émission et l'absorption de rayonnement, soit E/A , quantité universelle étant donné qu'il est le même pour tout matériau, est précisément égale à l'émission du corps noir. En d'autres mots, compte tenu que l'absorption est totale ($A=1$), le rapport E/A équivaut simplement à E , soit à l'émission du corps noir. Le rayonnement du corps noir constituera donc une notion fondamentale dans la mesure où il correspond à une quantité universelle, telle qu'établie par la loi de Kirchhoff. Et de plus, ce concept sera repris par d'autres physiciens, notamment par Max Planck, qui permettra un développement majeur en physique quantique.

Après les travaux de Kirchhoff, Willy Wien formule en 1894 une importante loi, connue sous le nom de *loi de déplacement de Wien*, fondée elle aussi sur les principaux principes de la thermodynamique classique. En gros, les travaux de Wien s'appuie sur la réflexion de la radiation thermique par une sphère parfaitement réfléchissante ($A=0$) qui subit une contraction très minime. Sous l'effet Doppler, la radiation est ainsi redistribuée, ou déplacée (d'où le nom de la loi), selon sa fréquence. Wien trouve que l'énergie, lors de ce phénomène, est une fonction de la fréquence et de la température. Selon la communauté des physiciens, il semble bien que Wien vient de faire la découverte d'une fonction très importante en physique. Au même titre que le rapport E/A dans

la loi de Kirchhoff, certains attribuent même, à cette fonction, un caractère universel. En 1900, selon la physique statistique, notamment au principe de l'équipartition de l'énergie, Rayleigh affirmera que cette fonction correspond en fait à une constante. De prime abord, la loi de déplacement de Wien, en tenant compte bien sûr de la précision qu'y a apportée Rayleigh, semble se conformer aux principes de la physique classique. Toutefois, lorsqu'on calcule l'énergie totale pour l'ensemble des fréquences, on remarque que le résultat est infini, et ce, particulièrement pour les hautes fréquences. Ce problème est bien connu sous le nom de la *catastrophe de l'ultraviolet*.

Autre chercheur incontournable dans l'histoire de la physique quantique, Max Planck s'intéressera bien sûr, à la fin du XIXe siècle et au début du XXe, au phénomène du rayonnement du corps noir. Comme l'a fait Kirchhoff, Planck travaillera à partir d'un modèle idéal, constitué d'un ensemble d'oscillateurs¹ électromagnétiques de fréquence donnée. Planck se réfère ensuite à un principe, formulé par Henri Poincaré, fondé sur les lois de l'électrodynamique. Selon ce principe, l'énergie moyenne d'un oscillateur électromagnétique correspond à celle d'un oscillateur matériel, type d'oscillateur responsable du rayonnement du corps noir. Donc, selon ce principe, le problème de la radiation thermique d'un corps peut alors être résolu en trouvant l'énergie d'un oscillateur électromagnétique, cette dernière étant proportionnelle à la fréquence.

En octobre 1900, à partir du modèle idéal décrit précédemment et du principe de Poincaré, Max Planck propose une formule qui rend compte finalement de la distribution de l'énergie liée au rayonnement du corps noir. Dans cette formule apparaît, notamment, le facteur $\exp(h\nu/kT)$, où k est la constante de Boltzmann et h une constante introduite par Planck lui-même. Il est à noter que cette formule ne peut être déduite des principes de la physique classique. Mais soulignons que Planck a réussi à dériver, en partie, cette équation en effectuant l'*interpolation* entre deux expressions liées à l'entropie S de l'oscillateur. D'ailleurs, à propos de cette opération mathématique, c'est-à-dire l'interpolation, Max Jammer émet un commentaire particulier, affirmant qu'il

¹ À titre d'information seulement, expliquons ce qu'est un oscillateur, car cette notion reviendra à quelques reprises dans le chapitre. Un oscillateur est simplement un phénomène physique faisant intervenir un mouvement périodique de fréquence donnée. On fait ici la distinction entre deux types d'oscillation : (i) une oscillation électromagnétique, telle que la lumière, qui fait intervenir l'oscillation d'un champ électrique et d'un champ magnétique; (ii) une oscillation matérielle, telle que le rayonnement ou la radiation thermique d'un corps, qui fait intervenir le mouvement relatif des atomes entre eux, comme s'il s'agissait de « vibrations élastiques ».

s'agit peut-être de l'étape qui a, en fait, permis à la physique sa révolution quantique. Il vaut la peine, ici, de citer le passage de Max Jammer :

This interpolation, though mathematically a mere trifle, was one of the most significant and momentous contributions ever made in the history of physics. Not only did it lead Planck, in his search for its logical corroboration, to the proposal of this elementary quantum of action and thus initiated the early development of quantum theory, as we shall see presently ; it also contained certain implications which, once recognized by Einstein, affected decisively the very foundations of physics as well as their epistemological presuppositions. Never in the history of physics was there such an inconspicuous mathematical interpolation with such far-reaching physical and philosophical consequences. (Jammer 1989 : 14)

Rappelons que l'équation de Planck ne peut d'aucune façon être dérivée de la physique classique. L'introduction de la constante h , et la multiplication de cette dernière avec la fréquence, soit le produit $h\nu$, donnant comme résultat une énergie, ne saurait être expliqué par l'approche classique. D'où vient alors cette expression d'énergie $h\nu$, qui permet, selon l'équation proposée par Planck, de rendre compte du rayonnement du corps noir? En fait, pour y répondre, il faudra franchir un pas, insoupçonné, qui ouvrira la porte à une toute nouvelle approche, c'est-à-dire l'approche quantique.

Planck va franchir ce pas en affirmant que, contrairement à ce que prévoit la physique classique, le spectre d'énergie n'est pas continu. Il est caractérisé par des valeurs *discrètes*. En d'autres mots, l'énergie est *quantifiée*. L'énergie totale d'un système, comme le rayonnement d'un corps noir, correspond donc à un multiple intégral du quantum d'énergie fondamental, $\varepsilon = h\nu$. Mentionnons que Planck appuie son raisonnement sur un principe établi par Boltzmann, servant à calculer l'énergie moyenne d'un système à l'équilibre. Ce raisonnement sera plus tard corroboré par Poincaré.

On s'intéressera plus tard à un autre type de rayonnement, non celui émanant d'un corps, auquel s'est intéressé Planck, mais à la lumière, c'est-à-dire au rayonnement électromagnétique. Compte tenu de la synthèse effectuée par Maxwell, au XIXe siècle, entre l'électricité et le magnétisme, qui a permis le développement de l'électromagnétisme et la formulation des célèbres « équations de Maxwell », il n'est jamais venu à l'esprit de Planck de remettre en question la théorie de Maxwell en soumettant la lumière à une nouvelle hypothèse, soit l'hypothèse de quantification de

l'énergie, hypothèse qui régit le rayonnement d'un corps matériel. Mais, fort heureusement, cette idée est venue à l'esprit d'un autre physicien, à celui d'Einstein. Étant donné le principe de Boltzmann, selon lequel l'énergie d'un oscillateur matériel équivaut à l'énergie d'un oscillateur électromagnétique, pourquoi la lumière, se demande alors Einstein, ne serait-elle pas elle aussi soumise au principe de la quantification de l'énergie?

Avec l'idée d'Einstein, nous assistons à la naissance de *photons*, ces *quanta* de lumière, qui seront à l'origine du phénomène communément appelé *effet photoélectrique*. Expliquons brièvement ce phénomène. Nous avons une plaque de métal sur laquelle est projeté un faisceau de lumière. Des électrons sont émis de la plaque de métal lorsque la fréquence du faisceau de lumière atteint un seuil minimum. Contrairement à ce que prédit la théorie classique, même si l'on augmente l'intensité du faisceau de lumière, il n'y a pas d'émission d'électrons de la plaque de métal si la fréquence du faisceau de lumière n'atteint pas le seuil minimum.

Einstein explique ce phénomène en affirmant que le faisceau de lumière est composé en fait de *photons* ou de *quanta* de lumière. À chacune de ces « particules » de lumière est associée une énergie, $\varepsilon = h\nu$, le même quantum d'énergie fondamental associé au rayonnement thermique d'un corps. C'est pourquoi, lors de l'effet photoélectrique, les photons de lumière doivent avoir une énergie minimum, qui est fonction de la fréquence de la lumière et non de son intensité, pour extraire les électrons de la plaque de métal.

L'existence de quanta de lumière sera beaucoup plus difficile à accepter par les physiciens que les quanta de Planck, c'est-à-dire les quanta liés au rayonnement d'un corps. Toutefois, les traces que laissent, sur une plaque photographique, des rayons X, rayonnement de fréquence élevée et possédant donc une énergie élevée, s'apparentent largement aux trajectoires laissées par des particules et, en conséquence, cela renforce l'hypothèse d'Einstein. Ce n'est qu'en 1923 qu'Arthur Compton vérifiera expérimentalement l'existence des photons en observant la diffusion de rayons X sur une plaque de graphite.

Un autre phénomène physique faisant intervenir la quantification de l'énergie est celui de la chaleur spécifique d'un corps solide. À propos de ce phénomène, le commentateur Max Jammer af-

firmera que le développement de la physique quantique, du point de vue théorique, aurait été sans doute plus facile si les recherches avaient d'abord porté précisément sur ce phénomène au lieu de celui de la radiation thermique :

One may conjecture how an independent and consistent solution of this problem on specific heat would have influenced the progress of theoretical physics. It seems highly probable that in this hypothetical case energy quantization of material systems (atoms or molecules) would have preceded that of waves and the approach to quantum theory would have been conceptually less difficult. (Jammer 1989 : 1)

Rappelons qu'à cette époque, on affirme qu'un corps consiste en un ensemble d'oscillateurs correspondant au mouvement, de fréquence déterminée, des atomes l'un par rapport à l'autre. Il s'agit en quelque sorte de « vibrations élastiques » entre les atomes du corps solide. C'est le modèle qu'utilisera Einstein, en 1907, pour étudier le phénomène de la chaleur spécifique. Soulignons qu'Einstein associera une fréquence unique à l'ensemble des oscillateurs composant le corps tandis que Peter Debye utilisera plus tard une distribution de différentes fréquences pour caractériser le mouvement des oscillateurs, rendant ainsi le modèle plus réaliste. Alors, en appliquant le modèle de Planck fondé sur la quantification de l'énergie, il est possible de calculer l'énergie totale de l'ensemble d'oscillateurs composant le corps et, de ce fait même, il est possible d'obtenir aussi sa chaleur spécifique. L'énergie totale, calculée en fonction de la formule de Planck, et la chaleur spécifique qui y sera associée seront conformes aux résultats expérimentaux, confirmant une fois de plus l'hypothèse de la quantification de l'énergie de Planck. De plus, il sera désormais possible d'expliquer, à partir de cette théorie quantique, les observations de la chaleur spécifique faites à des températures très basses. Notons que ces observations ne pouvaient être expliquées en vertu de l'approche classique en mécanique statistique.

1.2. Bohr & Sommerfeld : l'atome d'hydrogène

Comme on l'a vu à la section précédente, la première période de l'ancienne MQ a été dominée essentiellement par la contribution de Planck et Einstein, qui a permis de confirmer l'hypothèse de quantification de l'énergie, et ce, autant pour la radiation thermique émanant d'un corps que pour le rayonnement électromagnétique tel que la lumière.

La présente section du mémoire porte sur la fin et, on le verra, sur l'échec de l'ancienne MQ. Cette deuxième période de l'ancienne MQ, qui débute approximativement en 1913 et se termine en 1925, a essentiellement comme objet d'étude la structure de l'atome d'hydrogène et est marquée par la contribution de deux physiciens importants, soit Niels Bohr et Arnold Sommerfeld.

En quelques mots, pour résumer à grands traits cette seconde période de l'ancienne MQ, on peut dire que les physiciens privilégient encore, à cette époque, une approche classique mais, compte tenu des découvertes significatives effectuées par Planck et Einstein, ils ont également le souci d'intégrer, dans les lois de la physique classique, les nouvelles données tirées de l'approche quantique, comme la constante de Planck. Malgré tout, ce souci de l'approche quantique, tout en maintenant les principes généraux de la physique classique, sera nettement insuffisant pour rendre compte des phénomènes à l'échelle microscopique, ce qui causera l'échec de l'ancienne MQ mais qui, fort heureusement, favorisera un changement radical de pensée qui permettra l'émergence, vers 1925, de la nouvelle MQ à partir, essentiellement, des travaux de Werner Heisenberg et de Erwin Schrödinger.

Mais, pour l'instant, décrivons brièvement les principaux modèles atomiques de l'époque pour être en mesure de comprendre, par la suite, celui proposé par Bohr et Sommerfeld. Rappelons qu'à l'époque de Newton, en vertu du modèle de John Dalton, l'atome est une minuscule sphère dure et indestructible. En fait, cette représentation découle directement de celle des Grecs, en particulier de Démocrite, qui affirmait que la matière était composée de particules élémentaires désignées par le terme *atome*, du mot grec *atomos* signifiant « indivisible ». Compte tenu de la nature électrique de l'atome et, en particulier, de la découverte de l'électron, J.J. Thomson suggéra en 1903 le modèle communément appelé *plum-pudding*. Plus précisément, il s'agit d'une sphère homogène, chargée positivement, dans laquelle se déplacent des électrons de charge négative. En 1911, Ernest Rutherford, avec ses deux étudiants Hans Geiger et Ernest Marsden, propose, à la suite d'une expérience dont les résultats seront concluants, un modèle qui remettra en question celui de Thomson. L'expérience en question, réalisée par Geiger et Marsden, consiste à bombarder une très mince feuille de métal de particules α (noyaux d'hélium), de source radioactive et chargées positivement. Geiger et Marsden ont pu observer que certaines de ces particules

étaient déviées selon un angle considérable. Ce phénomène ne pouvait être expliqué qu'en supposant que la charge positive de l'atome était concentrée dans une toute petite région, plus particulièrement en son centre. Nous assistons donc, avec Rutherford, à la naissance du modèle *planétaire* de l'atome, au centre duquel se situe le *noyau*, chargé positivement, autour duquel gravitent les électrons.

Le modèle de Rutherford présente toutefois de sérieuses difficultés. Premièrement, les électrons, qui gravitent autour du noyau, sont soumis à une accélération centripète. Selon la théorie classique de l'électromagnétisme de Maxwell, toute charge en accélération, dans ce cas-ci à une fréquence donnée, émet un rayonnement de même fréquence. La particule perd alors de l'énergie et, ultimement (et rapidement!), s'effondre sur le noyau. En conséquence, à cet égard, le modèle planétaire de l'atome, tel qu'élaboré par Rutherford, n'est pas valable. Enfin, contrairement au rayonnement continu qui serait en principe émis par l'électron selon les mêmes lois classiques de l'électromagnétisme de Maxwell, le spectre d'émission des atomes n'est pas continu. Les différentes raies composant un spectre d'émission d'un atome sont de fréquences précises. En d'autres mots, elles ont des valeurs discrètes, et non continues. Signalons qu'à l'époque, soit à la fin du XIXe siècle et au début du XXe, la spectroscopie est une science relativement bien développée. En général, on connaît bien la fréquence des raies du spectre d'émission de la plupart des atomes. À ce titre, Johannes Rydberg a formulé en 1890 un principe fondamental en spectroscopie selon lequel la fréquence d'une raie du spectre d'émission d'un atome, soit ν_{nm} , correspond à la différence entre deux « fréquences de référence » de cet atome, c'est-à-dire $\nu_n - \nu_m$. Ces fréquences de référence, dans le cas précis de l'atome d'hydrogène, peuvent être calculées à partir d'une formule proposée par Rydberg et Johann Balmer : $\nu_n = R_0 / n^2$, R_0 étant la constante de Rydberg et n un entier. Mais à quoi, au juste, correspondent ces fréquences de référence? Pour y répondre, il faudra attendre les explications de Bohr, ce qui mènera à l'élaboration de son propre modèle atomique.

Malgré les difficultés que nous venons d'énumérer, Bohr ne voulait pas laisser tomber la structure fondamentale du modèle atomique proposé par Rutherford, soit le modèle planétaire. Et de plus, dans le cas de l'hydrogène, la structure est très simple : nous avons un noyau autour duquel gravite un seul électron, mouvement qui correspond à un système de Kepler. Mais, comme nous

l'avons mentionné, comment expliquer que l'électron ne s'effondre pas sur le noyau étant donné les lois de l'électromagnétisme, et pourquoi le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène n'est-il pas continu? Une étape significative et décisive sera franchie dans l'histoire de la physique par Niels Bohr lorsque celui-ci soumettra le modèle atomique de Rutherford à l'approche quantique, par le biais essentiellement de l'hypothèse de quantification de l'énergie formulée par Planck et Einstein. Si, comme l'a montré Planck pour le rayonnement thermique émanant d'un corps, l'énergie d'un oscillateur matériel est quantifiée et si, comme l'a montré Einstein dans le cas de la lumière, l'énergie d'un oscillateur électromagnétique est également quantifiée, pourquoi l'atome d'hydrogène, se demande alors Bohr, ne serait pas caractérisé par des niveaux d'énergie quantifiés, E_n , conformément à l'approche quantique? L'électron de l'atome d'hydrogène ne peut alors se déplacer que sur des orbites précises, celles qui correspondent aux niveaux d'énergie permis, soit E_n , ce qui évite par conséquent le premier problème que nous avons soulevé, c'est-à-dire l'effondrement de l'électron sur le noyau de l'atome. De même, le second problème, celui du spectre d'émission discontinu, peut être résolu en affirmant que la fréquence des différentes raies du spectre correspond à la fréquence des photons émis lorsque l'électron passe d'une orbite d'énergie supérieure E_m à une orbite d'énergie inférieure E_n . En termes plus précis, la fréquence des photons émis, ν_{mn} , peut être calculée en effectuant la différence entre les niveaux d'énergie et en tenant compte évidemment de la constante de Planck : $\nu_{mn} = (E_m - E_n) / h$. Cette explication a le mérite d'être conforme à l'explication donnée par Einstein de l'effet photoélectrique, selon lequel un faisceau de lumière est composé de « particules », c'est-à-dire de photons, auxquels on associe une énergie $h\nu$. Enfin, lorsque nous avons parlé des « fréquences de référence », évoqués par Rydberg dans son principe, nous savons maintenant qu'il s'agit, en vertu des explications de Bohr, des fréquences propres aux orbites d'énergies permises E_n , d'où l'expression « fréquences de référence ».

Une autre étape significative de l'histoire de la physique sera franchie par Niels Bohr dans son célèbre article « On the constitution of atoms and molecules » publié dans le *Philosophical Magazine* en 1913. Selon Bohr, l'approche quantique suggère non seulement la quantification de l'énergie mais aussi la quantification du moment angulaire. En d'autres mots, comme pour l'énergie, le moment angulaire doit être un multiple de la constante de Planck. En considérant que les orbites sont (en principe) circulaires et que le moment angulaire est quantifié, Bohr réussira à

calculer les énergies permises E_n de l'atome d'hydrogène. Bien qu'avec Rydberg, nous avons une connaissance de ces E_n en fonction de la fréquence des raies du spectre d'émission, nous avons maintenant l'explication de ses niveaux d'énergie permis de l'atome d'hydrogène, fondée sur la quantification du moment angulaire.

La théorie de Bohr expliquera, en général, assez bien l'ensemble des données relatives à l'atome d'hydrogène. Einstein sera d'ailleurs convaincu de l'importance de la découverte de Bohr, notamment à cause de la conformité des résultats de ce dernier avec ceux de Rydberg. Mais l'explication de deux phénomènes en particulier convaincront davantage la communauté des physiciens du principe établi par Bohr. Le premier phénomène a trait au rayonnement d'une étoile (*Puppis ζ*). Le spectre d'émission de cette étoile est relativement semblable à celui de l'hydrogène, mais il est tout de même nécessaire d'apporter une correction importante à la constante de Rydberg, R_0 , pour satisfaire les données de son spectre d'émission. Mais, selon la théorie de Bohr, pour se conformer à ces données, il suffit de remplacer la charge de l'hydrogène par celle de l'hélium, soit le double. Plus tard, il sera vérifié, en laboratoire, que les données ainsi obtenues par Bohr seront conformes au spectre d'émission de l'hélium (ionisé), soit le gaz constituant principalement l'étoile en question, qui est responsable de la nature du rayonnement. Le second phénomène, quant à lui, est relatif à la révolution de l'électron autour du noyau. Selon Bohr, l'électron ne tourne pas précisément autour du noyau, mais bien autour du *centre de gravité* du système. Autrement dit, pour décrire la révolution de l'électron, il faut en fait tenir compte de la *masse effective* du système, c'est-à-dire tenir compte à la fois de la masse du noyau et de la masse de l'électron, même si celle-ci est petite par rapport à la masse du noyau. Cette précision apportera, en fonction des équations de la théorie de Bohr, une correction, non négligeable, de l'ordre de $1/2000$ dans les résultats, ce qui sera conforme aux observations expérimentales effectuées en spectroscopie, qui gagne à cette époque en précision.

Abordons maintenant un autre principe très important établi par Bohr, le *principe de correspondance*. Selon ce principe, il y a correspondance entre la mécanique classique et la mécanique quantique. En termes plus précis, Bohr affirme, selon ce principe, que la mécanique classique est un *cas limite* de la mécanique quantique. On est donc capable de reproduire les résultats de l'approche classique en adoptant l'approche quantique, mais cela, à certaines conditions limites.

Rappelons que, selon la physique classique, la fréquence du rayonnement émis correspond à la fréquence de la révolution de l'électron sur son orbite. Selon l'approche quantique, si l'on considère un nombre quantique très élevé, qui tend même vers l'infini (ce qui constitue un cas limite), la différence d'énergie entre ce niveau et le niveau précédent est très minime et, *à la limite*, négligeable. Compte tenu de cette différence négligeable, la transition de l'électron entre les niveaux d'énergie manifeste un spectre d'émission quasi continu correspondant, comme le prévoit l'approche classique, à la fréquence de l'électron sur son orbite.

Un autre physicien important, Arnold Sommerfeld, modifiera la conception de l'atome d'hydrogène tel que conçu par Bohr. Rappelons que Bohr a obtenu ses résultats en considérant la trajectoire de l'électron autour du noyau comme une orbite circulaire. En apportant des corrections de nature relativiste au système de Bohr, Sommerfeld affirmera que l'orbite est plutôt elliptique. À ce propos, Max Jammer a le commentaire suivant :

Finally, in the second part of his paper [«Zur Quantentheorie der Spektrallinien»] Sommerfeld treated the problem relativistically. He showed that as in the case of every periodic motion under the influence of a central force, the electron with rest mass m describes a rosette or, more precisely, an ellipse with a slowly precessing perihelion and with one of its foci at the nucleus. Originally Sommerfeld solved the problem by a relativistic generalization of the nonrelativistic treatment of the Kepler motion (Jammer 1989 : 97)

L'ensemble des physiciens espéraient que la précision de Sommerfeld donnerait à la théorie de Bohr une portée beaucoup plus générale pour qu'on puisse enfin rendre compte des données relatives aux autres atomes. Mais ce ne fut pas le cas. Toutefois, l'approche relativiste de Sommerfeld a permis d'éclairer davantage *l'effet Zeeman*. Ce phénomène physique se produit lorsque l'atome d'hydrogène est soumis à un champ magnétique. On peut alors observer, grâce au progrès de la spectroscopie et à sa résolution plus précise, que certaines raies du spectre d'émission se divisent en sous-raies, soit en deux ou trois raies rapprochées. C'est ce qu'on appelle la *structure fine* du spectre d'émission de l'atome d'hydrogène. En termes simples, Sommerfeld est arrivé, en adoptant une approche relativiste et en considérant des orbites elliptiques, à des énergies qui sont légèrement différentes de celles calculées par Bohr et qui expliqueraient les sous-raies que l'on peut observer dans le spectre d'émission. Signalons enfin, à titre historique, que Sommerfeld a eu recours, tout au long de son analyse, à un formalisme de la mécanique newtonienne, qui constituera un outil d'analyse très puissant en MQ. Il s'agit de la théorie de Lagrange,

d'Hamilton et de Jacobi. En gros, il s'agit d'une théorie où l'énergie d'un système physique, l'*Hamiltonien*, est exprimée en fonction de coordonnées indépendantes (q, p) et où il est plus facile d'obtenir les équations de mouvement d'un système à partir de constantes dynamiques. Mais, précisons-le, il ne s'agit que d'un formalisme; il n'y a aucun nouveau concept physique étranger à la mécanique newtonienne. Mais, nous le répétons, ce sera un outil d'analyse très efficace en MQ.

Décrivons maintenant ce que l'on pourrait considérer comme le « crépuscule » de l'ancienne MQ, qui s'étend approximativement de 1921 à 1925 et durant lequel il y aura néanmoins l'élaboration de concepts considérés comme très importants, tels que le principe d'exclusion de Wolfgang Pauli et le concept de spin de l'électron.

En 1921, Bohr procède à une étude comparative du spectre d'émission de l'ensemble des éléments du tableau périodique. Il établira le principe suivant lequel la configuration électronique des différents atomes est formée essentiellement de *couches successives* en fonction desquelles sont distribués les électrons. Par exemple, la configuration électronique du premier élément, l'atome d'hydrogène, contient, on le sait, un seul électron. L'élément suivant du tableau périodique, l'hélium, contient deux électrons, qui complètent la première couche. Le lithium, troisième élément, est composé de trois électrons, dont les deux premiers forment la première couche et dont le troisième est situé sur la couche suivante. Bohr adoptera ce raisonnement, c'est-à-dire celui de *couches successives*, pour décrire la configuration électronique des différents éléments du tableau. Bohr attribuera ensuite à chaque électron, formant les différentes couches, un ensemble de nombres, plus précisément les *nombres quantiques*. Le premier de ces nombres, n , le *nombre quantique principal*, a trait au niveau d'énergie de l'électron. Les deuxième et troisième nombres, l et m_l , le *nombre quantique orbital* et le *nombre quantique magnétique orbital*, ont trait au moment angulaire de l'électron en fonction de son orbite autour du noyau. Plus tard, un quatrième nombre, le *nombre quantique magnétique de spin*, m_s , sera introduit par George Uhlenbeck et Samuel Goudsmit. En termes simples, on définit ce nombre comme étant le moment angulaire *propre* de l'électron et, afin de donner une image classique (mais incorrecte!) de ce concept, on dit qu'il s'agit en quelque sorte d'une rotation de l'électron sur lui-même. On a donc

quatre nombres quantiques, (n, l, m_l, m_s) , décrivant l'état de particules, les électrons, qui forment les atomes.

Cependant, dans la description dont nous venons de faire état, une question demeure : pourquoi les particules dans les atomes sont-elles distribuées selon des niveaux ou des couches successives? L'état fondamental d'un élément ne requiert-t-il pas, en principe, que l'ensemble de ses particules soient au même niveau, le niveau le plus bas d'énergie, qui correspond à l'état le plus stable? Wolfgang Pauli apportera en 1925 une réponse à cette question en établissant un principe, le *principe d'exclusion*, selon lequel deux électrons, dans un atome, ne peuvent pas être dans le même état et ne peuvent donc être décrits par les mêmes nombres quantiques. Chaque atome, ou chaque élément du tableau périodique, est composé de particules dont les états sont différents. Sinon, deux éléments pourraient avoir la même configuration électronique et manifester par exemple les mêmes propriétés chimiques.

En somme, les notions de *couches successives*, de *nombres quantiques* et le *principe d'exclusion* constituent des concepts essentiels en MQ et auront le mérite d'expliquer de multiples phénomènes physiques et chimiques.

1.3. Heisenberg, Born & Jordan : mécanique matricielle

Bien que certains concepts développés dans le cadre de l'ancienne MQ soient certainement valables, comme les nombres quantiques et le principe d'exclusion, on semble désormais avoir atteint la limite de cette théorie dans la mesure où elle n'arrive plus à expliquer l'ensemble des phénomènes microscopiques. Bohr lui-même affirmera qu'il est maintenant nécessaire d'opérer un changement radical de pensée et d'adopter ainsi une toute nouvelle approche en physique. Il apparaît même souhaitable de rompre avec le mode de pensée traditionnel en physique, soit celui développé en fonction de la mécanique classique. Cela signifie donc, et surtout, la remise en question du recours à notre intuition pour saisir la nature des principaux concepts, même ceux considérés comme les plus élémentaires, de la physique. Donc, nous ne pouvons plus nous en remettre au sens commun ou à une « représentation visuelle » standard, comme le permettait de le

faire la mécanique classique, pour comprendre des concepts aussi familiers que ceux de la position, de la vitesse, de l'énergie, etc... D'ailleurs, certaines expériences, réalisées à la fin de la période de l'ancienne MQ, remettent déjà en question des notions aussi communes que celle de la trajectoire, d'un point A vers un point B, d'une particule comme l'électron sur son orbite. En somme, on peut considérer que les outils d'analyse développés par la physique classique ne semblent plus adéquats pour rendre compte du monde microscopique.

Une toute nouvelle approche développée par trois physiciens, Werner Heisenberg, Max Born et Pascual Jordan, va rompre de manière radicale avec la mécanique classique. Désormais, selon cette approche, toute quantité physique observable, comme la position d'un objet, sa quantité de mouvement ou son énergie, correspond à un objet abstrait, à un objet mathématique, c'est-à-dire à une matrice X_{nm} . Donc, il n'est plus question, ici, d'associer à un observable un nombre ou une quantité, comme le suggère la mécanique classique. Un observable est maintenant une matrice. Nous abordons maintenant, dans la présente section de ce chapitre, l'approche dite matricielle, telle que développée principalement par Heisenberg.

L'inspiration de Heisenberg, qui lui a permis de développer sa nouvelle approche, a fondamentalement deux sources : (i) le concept d'*état stationnaire*, tel qu'élaboré par Bohr; (ii) une expérience, réalisée à titre de collaborateur de H. Kramers, portant sur la dispersion de la lumière.

En ce qui concerne la première source d'inspiration de Heisenberg, rappelons que Bohr a défini le phénomène d'émission de rayonnement de fréquence ν comme la transition de l'électron d'un état stationnaire d'énergie supérieure à un autre état stationnaire d'énergie inférieure, et la différence d'énergie entre ces états stationnaires correspond à l'énergie permettant de calculer la fréquence ν du rayonnement, correspondant à la fréquence de l'une des raies du spectre d'émission de l'atome d'hydrogène. À la suite de ce raisonnement de Bohr, Heisenberg affirmera qu'il y a des états stationnaires non seulement pour l'énergie, qui rend compte du phénomène physique de l'émission de rayonnement, mais également pour toute quantité physique observable. Et c'est à la transition entre ces états stationnaires, par exemple de l'état n à l'état m , que Heisenberg associera à tout observable une matrice, par exemple la matrice X_{nm}

Mais, d'un point de vue physique, à quoi peut bien correspondre cette matrice par rapport à l'observable qui lui est associé? En fait, nous verrons que c'est plutôt le carré de cette matrice, $[X_{nm}]^2$, qui correspond à un processus physique, et c'est là où intervient, comme deuxième source d'inspiration de Heisenberg, l'expérience qu'il a réalisée avec Kramers sur la dispersion de la lumière. En gros, dans cette expérience, en observant l'interaction de la lumière avec un atome, on remarque qu'il y a une relation entre l'index de réfraction et la fréquence de la lumière. Mais, en ce qui nous concerne, le principal résultat établi dans cette expérience indique que la transition entre deux états stationnaires, décrit par Bohr, passe plutôt par un niveau intermédiaire. Par exemple, de l'état n à l'état m , il y a un niveau intermédiaire k . Alors, la transition se fait en fait en deux étapes : (i) de n à k ; (ii) de k à m . À ces deux transitions intermédiaires, Heisenberg a le génie d'associer à chacune une matrice, X_{nk} et X_{km} , et la transition complète correspond à la *multiplication* de ces deux matrices intermédiaires, ce qui donne le carré de la matrice de l'observable. En conséquence, il importe de comprendre que c'est bien le carré de la matrice, par le biais de la multiplication des matrices intermédiaires, qui correspond à un processus physique, celui qui a été observé dans l'expérience réalisée par Heisenberg et Kramers. Mentionnons, à titre d'information seulement, que le processus dont il est question ici correspond au *processus de Raman*.

Après avoir montré que le carré d'une matrice d'un observable correspond à un processus physique, nous allons maintenant faire référence à une autre opération qui permet d'obtenir des données très importantes par rapport à l'observable. Il s'agit de la *diagonalisation* de la matrice, opération à partir de laquelle nous obtenons ses *valeurs propres*. Les valeurs propres d'une matrice correspondent à l'ensemble des valeurs que peut prendre, lors d'une mesure, l'observable en question. Aucune autre valeur n'est possible lors de la mesure. En d'autres mots, il s'agit, en MQ, des *valeurs permises* de l'observable. En effectuant l'opération de diagonalisation, ce sont les éléments de la diagonale de la matrice qui correspondent aux valeurs de l'observable. Signalons enfin que toute matrice, associée à un observable, doit être *hermitique* ou *auto-adjointe*, propriété selon laquelle les valeurs propres, c'est-à-dire les éléments diagonaux, de la matrice sont *réels*. Cette propriété est évidemment essentielle puisque les valeurs propres doivent correspondre à des résultats de mesure.

Traisons, pour finir, des relations de commutation entre les matrices des observables, qui sont à l'origine du célèbre principe d'incertitude de Heisenberg. En termes simples, les matrices qui ne commutent pas entre elles ne partagent pas d'*états propres* communs. Rappelons qu'aux états propres d'une matrice d'un observable sont liées ses valeurs propres, soit les résultats de mesure de l'observable. C'est pourquoi il est impossible de mesurer simultanément deux observables si leurs matrices respectives ne partagent pas entre elles d'états propres, c'est-à-dire si elles ne commutent pas². Citons l'exemple standard : le principe d'indétermination soutient qu'il est impossible de mesurer simultanément la position d'une particule et sa quantité de mouvement. Cela signifie donc que les matrices associées à ces deux observables ne commutent pas ou ne partagent pas entre elles d'états propres communs. Autrement dit, il n'y pas d'état propre qui pourrait nous fournir *simultanément* des résultats de mesure pour la position et pour la quantité de mouvement. Finalement, les relations de commutation constitueront un outil essentiel pour établir les constantes dynamiques (ou constantes de mouvement) d'un système. Les constantes dynamiques correspondent précisément aux observables dont les matrices commutent avec l'hamiltonien, H . C'est donc dire que, lorsqu'un système se développe dans le temps, ces observables correspondent à des quantités qui sont conservées. Ces observables font donc l'objet de *principes de conservation*. Par exemple, la quantité de mouvement correspond à une matrice qui commute avec celle de l'énergie. La quantité de mouvement est donc, comme il est bien connu, une quantité conservée dans un système et fait donc l'objet d'un principe important de conservation en physique.

En conclusion, on peut affirmer que Heisenberg a réussi, comme le souhaitait Bohr, à opérer en physique un changement radical de pensée, représentant ainsi une rupture quasi totale par rapport au mode de pensée traditionnel de la mécanique classique. En considérant désormais les quantités physiques observables comme des objets mathématiques abstraits, c'est-à-dire des matrices, et les relations qu'ils entretiennent entre elles par le biais des relations de commutation, Heisenberg a développé une toute nouvelle approche expliquant davantage de données relatives aux phénomènes microscopiques.

² On comprend d'ailleurs pourquoi il s'agit ici d'une impossibilité conceptuelle, et non d'une impossibilité technique qui serait liée aux appareils de mesure.

1.4. De Broglie, Schrödinger & Born : mécanique ondulatoire

S'il est vrai que Heisenberg a su représenter les observables par des matrices et décrire leurs rapports par les relations de commutation, qu'en est-il du système physique même? Comment peut-on décrire son évolution dans le temps, c'est-à-dire sa dynamique? Peut-on représenter le système physique par un objet mathématique, comme l'a été fait pour les observables?

La mécanique ondulatoire apportera la réponse à ces questions, essentiellement par le biais des travaux d'Erwin Schrödinger et de Max Born. Bien que Paul Dirac ait soutenu qu'avec la mécanique matricielle on arrive aux mêmes résultats, la mécanique ondulatoire apportera un élément essentiel, la *fonction d'onde*, dont ne pouvait plus se passer la physique quantique. Et, de plus, l'interprétation qu'aura Max Born de cette fonction d'onde marquera la rupture définitive par rapport à l'approche classique en physique. Mais avant de passer à Schrödinger et à Born, il est souhaitable de souligner la réflexion d'un prédécesseur important, soit celle du physicien français Louis de Broglie

Décrivons tout d'abord le contexte historique ayant favorisé l'émergence de l'hypothèse de De Broglie. Einstein a démontré que l'on pouvait attribuer à une onde, notamment à la lumière, des propriétés corpusculaires. C'est ce qu'illustre l'effet photo-électrique. Rappelons que, selon cet effet, pour qu'on puisse expliquer l'émission d'électrons par une plaque de métal sur laquelle est projeté un faisceau de lumière, on doit considérer que ce faisceau de lumière est en fait composé de « particules », de *photons*, possédant chacun une énergie, en fonction de la fréquence de la lumière, qui permet l'extraction des électrons à la surface du métal. Par la suite, en 1921, l'existence de ces photons a été confirmée expérimentalement par Arthur Compton. Par conséquent, dans le cas précis de la lumière, il est possible d'attribuer à cette onde électromagnétique des propriétés corpusculaires, ce qui confirme le principe de la *dualité onde-corpuscule*.

En vertu de ce principe, Louis de Broglie pose alors une question simple : si l'on peut associer à une onde des propriétés corpusculaires, pourquoi l'inverse ne serait-il pas possible? De prime abord, cette hypothèse semble farfelue et est donc accueillie avec un certain scepticisme de la part de l'ensemble des physiciens. Louis de Broglie émet tout de même son hypothèse, selon la-

quelle on peut associer à une particule, de quantité de mouvement déterminée, une longueur d'onde calculée en fonction de la constante de Planck. Alors, d'une part, la quantité de mouvement illustre les propriétés corpusculaires de la particule et, d'autre part, la longueur d'onde qui lui est associée démontre ses propriétés ondulatoires. Avec l'hypothèse de De Broglie, on parlera désormais d'*ondes de matière* étant donnée que les particules peuvent démontrer des propriétés ondulatoires. Et, également, le principe de la dualité onde-corpuscule semble devenir un principe très important de la nature compte tenu qu'à la suite de cette hypothèse, il s'applique à l'ensemble de la matière.

Comme nous l'avons mentionné, bien que la plupart des physiciens aient accueilli avec scepticisme l'hypothèse de Louis de Broglie, des données expérimentales semblent pourtant confirmer l'hypothèse en question. Citons deux exemples. Premièrement, l'hypothèse de Broglie confirme l'ensemble des trajectoires permises de l'électron tel que le décrit le modèle atomique de Bohr pour l'hydrogène. Alors que Bohr affirme que le moment angulaire de la trajectoire de l'électron autour du noyau doit être un multiple de la constante de Planck, de Broglie constate, pour sa part, que la longueur de la trajectoire de la particule autour du noyau doit être un multiple de la longueur d'onde qui est associée à la particule en question. Et les résultats, calculés en fonction de chaque modèle, sont les mêmes. Deuxièmement, à titre de confirmation expérimentale supplémentaire de l'hypothèse de Broglie, Clinton Davisson et Lester Germer ont réalisé en 1927 une expérience dans laquelle on pouvait observer un phénomène de diffraction lorsque des électrons étaient ciblés vers une plaque de cristal, comme on pourrait l'observer si l'on projetait, au lieu d'électrons, des rayons-X. En calculant la longueur d'onde des électrons en fonction de l'hypothèse de Broglie, on obtient ensuite l'angle de diffusion des électrons, angle qui correspond à celui observé dans l'expérience de Davisson et Germer.

Nous passons maintenant à un autre physicien, dont la contribution aura été significative non seulement pour la mécanique ondulatoire mais également pour l'ensemble de la physique quantique. À la suite des travaux de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, physicien autrichien, émettra une hypothèse beaucoup plus audacieuse que celle de son prédécesseur. Selon Schrödinger, la réalité physique correspond essentiellement, et même exclusivement, à celle des ondes, contrairement à ce qu'affirme le principe de la dualité onde-corpuscule. Autrement dit, les propriétés corpusculai-

res ne seraient en fait que le résultat de l'aspect exclusivement ondulatoire de la matière. En vertu de cette affirmation, Schrödinger considérera tout système physique comme une *fonction d'onde*. Ainsi, l'état d'un système est représenté par une fonction d'onde, $\psi(r,t)$, et l'ensemble des informations permettant de décrire le système physique, à savoir les observables, sont contenues dans la fonction d'onde. De même, selon cette description, on décrit souvent une particule, auquel est associée une fonction d'onde, comme un *paquet d'ondes*. De façon plus précise, c'est que la fonction d'onde, représentant la particule, est en fait une *superposition* d'ondes planes, dont les longueurs peuvent être calculées selon la relation de Broglie.

Dans son article rédigé en 1926, « Quantization as an Eigenvalue Problem », Schrödinger aura recours essentiellement à une équation de valeurs propres, qui apportera une solution à une grande partie des problèmes rencontrés par ses prédécesseurs. Tout d'abord, il associera à chaque observable un *opérateur hermitique*, qui s'avère l'équivalent d'une matrice chez Heisenberg. Pour tout opérateur lié à un observable, il est possible, en posant une équation de valeurs propres, d'obtenir les états propres et les valeurs propres de cet observable. Notons bien, puisqu'il s'agit d'un opérateur hermitique, que les valeurs propres calculées, correspondant aux résultats de mesure de l'observable, sont réels. Ainsi, à partir de cette méthode, Schrödinger sera capable de rendre compte non seulement des résultats obtenus par Bohr pour l'atome d'hydrogène, mais aussi des résultats concernant les autres atomes, à savoir ceux dont la configuration électronique, en particulier sur la couche supérieure, comporte plus d'un électron.

Bien que ce succès à expliquer la structure atomique de la plupart des éléments soit très important en MQ, la contribution majeure de ce physicien se situe ailleurs. Schrödinger établira une équation qui rendra compte du développement de la fonction d'onde dans le temps, c'est-à-dire de sa dynamique. En gros, selon cette équation, nommée communément l'*équation de Schrödinger*, on constate que l'évolution de la fonction d'onde d'un système physique se fait en fonction de l'hamiltonien, c'est-à-dire en fonction de l'énergie. Mentionnons que l'évolution de la fonction d'onde a évidemment un impact direct sur les résultats des observables susceptibles d'être obtenus.

Un physicien d'origine allemande, Max Born, franchira en MQ une étape considérée aussi déterminante que celle qu'a franchie Schrödinger. Max Born attribuera à la fonction d'onde, telle qu'élaborée par Schrödinger, une interprétation bien précise. Si, comme nous l'avons vu, les valeurs propres d'un opérateur ou d'une matrice correspondent aux résultats de mesure d'un observable, la fonction d'onde, quant à elle, permet de calculer la probabilité d'obtenir chaque résultat de mesure. En fait, pour être plus précis, le carré de la fonction d'onde $|\psi(r,t)|^2$, soit le produit de la fonction elle-même avec son conjugué complexe, correspond à une *densité de probabilité*. À partir de ce résultat, il est donc possible de calculer, en ce qui concerne par exemple la position en une dimension, la probabilité qu'une particule se situe dans l'élément de longueur dx . En somme, avec l'interprétation qu'a donnée Born de la fonction d'onde de Schrödinger, on assiste à une rupture radicale par rapport à la physique classique. On passe en effet d'une approche déterministe à une approche probabiliste.

Chapitre 2

Développement philosophique de la MQ

2.1. Interprétations fondamentales

2.1.1. Bohr & Heisenberg : interprétation de Copenhague

Après avoir présenté les principales étapes du développement historique de la MQ, j'aborde maintenant, dans ce chapitre, son aspect philosophique, et ce, par le biais de son interprétation. Mais avant d'aborder cet aspect, je rappelle que le formalisme de la MQ a été très bien établi. Malheureusement, comme nous le verrons plus loin, on ne peut en dire autant à propos de son interprétation. Celui qui a le plus contribué à appuyer le formalisme de la MQ sur des bases solides est John von Neumann, qui a publié en 1932 un ouvrage intitulé *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. En gros, selon von Neumann, on peut dire que le formalisme de la MQ correspond au calcul des opérateurs hermitiques de l'espace de Hilbert¹. Et ce formalisme sera d'autant plus confirmé par le fait que Schrödinger montrera que l'approche qu'il a développée, la mécanique ondulatoire, est équivalente à celle adoptée par Heisenberg, soit la mécanique matricielle. Notons que les deux approches correspondent à des réalisations particulières de l'espace de Hilbert, l'une correspondant à l'ensemble des fonctions dont le carré est intégrable (espace L^2) et l'autre correspondant à l'ensemble des suites convergentes du carré de la valeur absolue de nombres complexes (espace l^2). En d'autres mots, trouver les valeurs propres d'un opérateur dans l'espace L^2 est la même chose que la diagonalisation de la matrice correspondante dans l^2 . Mentionnons enfin que, sur la base de ce formalisme et d'autres découvertes, nous avons obtenu aussi une explication satisfaisante de nombreux phénomènes physiques, tels que les effets Stark et Zeeman.

Si, comme on peut le voir, le formalisme ou l'appareil analytique de la MQ est bien défini, son interprétation, quant à elle, pose un problème². Et l'interprétation physique constitue évidemment

¹ Je ne présente pas ici la forme axiomatique qu'a adoptée von Neumann pour définir le formalisme de la MQ. Pour connaître les 5 axiomes de von Neumann, voir Gauthier 1992 : 49 et Jammer 1974 : 5.

² On considère d'une certaine façon que, dans le cas de la MQ, le formalisme a précédé l'interprétation, ce qui est à première vue étonnant pour une théorie physique. Mais il ne faudrait pas croire pour autant que le formalisme de la MQ s'est développé en vase clos.

une composante essentielle de l'élaboration d'une théorie scientifique, surtout en physique bien sûr³. Par exemple, à quoi correspond la fonction d'onde telle que définie par Schrödinger? Et qu'en est-il des matrices de Heisenberg? Et de même, quelle est la nature des éléments microscopiques et des processus physiques dont rend compte le formalisme de la MQ? Lorsque, dans un échange informel, Schrödinger a présenté à Einstein le fruit de son travail, ce dernier a tenu à faire la remarque suivante : « Of course, every theory is true, provided you suitably associate its symbols with observed quantities » (Einstein cité dans Jammer 1974 : 23-24) Et la communauté des physiciens en général ressent un urgent besoin d'associer une interprétation physique à ce puissant outil de description du monde microscopique que constitue le formalisme de la MQ. Car, pour l'instant, on décrit naïvement, en fonction de l'approche de la physique classique, les particules élémentaires, comme l'électron, comme de petites « billes » tournant sur une orbite autour d'un noyau. Les pédagogues auront par exemple beaucoup de difficulté à expliquer à leurs élèves que l'on traite désormais l'électron comme une fonction d'onde. On se demandera alors si l'on a affaire à une particule? à une onde? Ou, plutôt, aux deux?! Pour le commun des mortels, il y a vraiment de quoi en perdre son latin.

Heisenberg : relations d'indétermination

Bien que Schrödinger ait démontré, comme on l'a vu, l'équivalence entre le formalisme de son système, la mécanique ondulatoire, avec celui de Heisenberg, la mécanique matricielle, les interprétations que chacun y attribue demeurent à toute fin pratique inconciliables. À l'été 1926, Sommerfeld, qui a contribué de façon significative au domaine de la physique quantique, invitera Schrödinger à Munich pour y donner une conférence au sujet du problème de l'atome d'hydrogène. Compte tenu de sa prétendue élégance pour rendre compte de la structure de l'atome d'hydrogène, le modèle de Schrödinger sera privilégié par les physiciens en général, et ce, au détriment de la théorie de Heisenberg. Ce dernier soutiendra toutefois que l'interprétation

³ « On suppose que l'on a des termes théoriques qui désignent des entités non observables et que l'on rattache à des entités observables désignées par des termes observationnels. Le rattachement est opéré par des règles d'interprétation ou de correspondance. C'est là le modèle classique de la théorie scientifique où l'on aurait un système semi-formel et une interprétation partielle. » (Gauthier 1995 : 11). Voir aussi Gauthier 1992 : 22-23, 42-43. Jammer (1974 : 9-17, 23) définit lui aussi une théorie scientifique à partir, entre autres, d'un système formel F, d'un ensemble de règles de correspondance R et d'un modèle M.

de Schrödinger comporte de sérieuses lacunes, dont celle, certainement pas négligeable, de ne pas pouvoir expliquer la loi fondamentale de la radiation formulée par Max Planck !

À la suite d'une lettre qu'il a reçu de Heisenberg à propos de cette conférence et des propos qui y ont été tenus, Bohr, à son tour, invite Schrödinger à son institut de Copenhague pour un court séjour. Les échanges y sont informels mais le climat demeure tendu. On ne peut que constater que les positions défendues par chacun, celle de Bohr et de Heisenberg d'une part et d'autre part celle de Schrödinger, sont difficilement compatibles entre elles. On y rapporte même une remarque faite par Schrödinger, concernant les états stationnaires définis par Bohr, qui montre bien une certaine exaspération face à tout ce débat : « If all this damned quantum jumping *<verdammt Quantenspringerei>*, I should be sorry I ever got involved with quantum theory » (Schrödinger in Jammer 1974 : 57)

Au-delà de ces considérations anecdotiques, évidemment d'importance secondaire, venons-en maintenant à ce qui nous intéresse, les relations d'indétermination de Heisenberg (Heisenberg 1927 in Wheller & Zurek (WZ) : 1983 : 62-84; Omnès 1999 : 45-48; Gauthier 1995 : 50-53; Jammer 1974 : 61-71). Par rapport à l'interprétation de Schrödinger, qui obtient l'appui de la plupart des physiciens, Bohr et Heisenberg demeurent convaincus que leur interprétation est supérieure. Ils concèdent toutefois qu'ils doivent y apporter des modifications pour rendre compte de certaines données de l'expérience. Par exemple, selon Heisenberg, , en mécanique matricielle, on ne peut rendre compte de la trajectoire de l'électron, phénomène qu'on est en mesure d'observer dans une chambre de Wilson. Heisenberg arrive difficilement à expliquer le fait que la MQ, outil très puissant au niveau microscopique, ne puisse expliquer un phénomène aussi banal que celui de la trajectoire faisant intervenir à la fois la position de la particule et son moment linéaire (ou sa vitesse). Doit-on alors rejeter la MQ compte tenu de son inefficacité à expliquer un phénomène aussi évident que celui de la trajectoire?

Bien sûr, pour Heisenberg, il n'est pas question de rejeter la théorie de la MQ. Il s'agit plutôt de reformuler tout le problème. Que signifie vraiment l'acte d'observer en physique, se demande alors Heisenberg? Heisenberg est persuadé que la solution au problème correspond à la réponse à cette question. Il se souvient alors d'une conversation qu'il a eue avec Einstein à la suite d'une

conférence donnée à Berlin en 1926. Einstein a alors dit : « It is the theory which decides what we can observe. » (Einstein *in* Jammer 1974: 57) Compte tenu que la théorie de la MQ ne permet pas d'expliquer la notion de trajectoire au niveau microscopique, Heisenberg soutiendra qu'on ne peut observer la trajectoire d'une particule comme l'électron. Et effectivement, comme on l'a démontré expérimentalement, la prétendue trajectoire « observée » de l'électron dans la chambre de Wilson ne correspond qu'à une suite très rapprochée mais non continue de positions successives de l'électron.

Heisenberg a bien l'impression de détenir maintenant la clé du problème, qui se résume à l'affirmation de Einstein selon laquelle la théorie détermine les phénomènes observables. Et ultimement, cette position mènera Heisenberg à associer la définition des concepts physiques à leur mesure : si, en conséquence, comme le stipule la théorie de la MQ, nous ne pouvons mesurer la trajectoire d'une particule, c'est que la trajectoire n'existe tout simplement pas au niveau microscopique.

Il s'agit maintenant de montrer brièvement comment le formalisme de la MQ interdit, au niveau microscopique, des concepts physiques comme celui de la trajectoire. En se référant à l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde telle que formulée par Max Born (Born 1926 *in* WZ 1983 : 52-55), il est possible de calculer la valeur moyenne et l'incertitude d'un observable. Dans le cas précis d'une fonction d'onde, pour laquelle la densité de probabilité de la position de la particule a une distribution gaussienne, Heisenberg a calculé que le produit de l'incertitude sur cette position Δx avec l'incertitude de son moment linéaire Δp est de $h/4\pi$. Le concept physique de la trajectoire, qui suppose une connaissance *simultanée* et *précise* de ces deux paramètres, est donc impossible compte tenu de la valeur minimum du produit des incertitudes de ces deux variables. De manière plus générale, les relations d'indétermination de Heisenberg sont fondées sur la non-commutation⁴ entre variables canoniques conjuguées, comme on vient de le voir pour la position et le moment linéaire d'une particule.

⁴ Cf. Gauthier 1995 : 50. En fait, au point de vue du formalisme, précisons que la notion de commutateur en MQ est directement liée à la notion de parenthèse de Poisson en mécanique classique. Cf. Gauthier 1992 : 83-84 (note 1) et Herbert Goldstein, *Classical Mechanics*, 1950 : 266

Si le formalisme défend ainsi une connaissance simultanée et précise de ces deux paramètres, vérifions s'il en est de même au niveau expérimental. Il s'agit en quelque sorte de « visualiser », au moyen d'une expérience de pensée, les relations d'indétermination de Heisenberg. Cette expérience, la plus connue et la plus citée, se nomme le *microscope de Heisenberg*⁵. En gros, cette expérience consiste à déterminer, en utilisant un microscope, la position d'un électron illuminée par un faisceau de lumière. Un maximum de précision pour la position de la particule sera obtenue si l'on utilise un microscope à rayons gamma, qui sont de très courte longueur d'onde. Si l'on peut ainsi déterminer avec précision la position de l'électron, il en va autrement pour le moment linéaire de la particule. Compte tenu de l'effet Compton, qui consiste en gros (et naïvement) en une « collision » entre les photons et la particule lorsqu'on illumine celle-ci pour connaître sa position, il n'est donc plus possible de connaître précisément le moment linéaire de la particule puisque cette « collision » a eu pour conséquence de modifier ce paramètre. Une connaissance à la fois de la position d'une particule et de son moment linéaire, avec certitude, n'est donc pas possible, ce qui confirme la théorie de la MQ.

Bohr critiquera à plus d'un point de vue l'expérience réalisée par Heisenberg (cf. Jammer 1974 : 64-69) et il tentera même de convaincre celui-ci de ne pas publier son article. Je présente ici deux remarques faites par Bohr à propos de cette expérience, et j'insisterai davantage sur la deuxième, qui a des conséquences fondamentales sur le débat de l'interprétation de la MQ. La première remarque est de nature simplement technique et correspond à une omission d'un phénomène physique, qui n'est tout de même pas négligeable dans cette expérience. Si Heisenberg a tenu compte de l'effet Compton pour conclure à une incertitude du moment linéaire de la particule, il aurait également dû tenir compte d'un autre phénomène physique, la diffraction, causé par l'interaction du photon avec l'orifice du microscope, causant ainsi une incertitude sur la position de l'électron. On ne peut déterminer, avec un degré infini de précision, la position d'une particule tout en mesurant, même avec une très grande incertitude, son moment linéaire. Dans une note ajoutée à la fin de son article (Heisenberg 1927 in WZ 1983 : 83-84), Heisenberg concédera à Bohr le fait que ce « point essentiel » a été omis de sa part.

⁵ Gauthier (1995: 50-51) se réfère à une autre expérience de pensée, inspirée de Hanson, qui permet également d'illustrer, ou de visualiser, les relations de Heisenberg.

La deuxième remarque formulée par Bohr, celle qui en fait l'a incité à recommander à Heisenberg de ne pas publier son article, dépasse de loin le simple caractère technique de la remarque précédente et a un impact beaucoup plus significatif. Précisons tout d'abord que Bohr ne remet pas en cause la validité des relations d'indétermination de Heisenberg. Bohr remet plutôt en cause le fondement sur lequel repose le raisonnement de Heisenberg pour dériver ses relations. Cette remarque, qui prendra ultérieurement la forme d'un débat entre Bohr et Heisenberg, permettra premièrement la mise en valeur d'un principe fondamental en MQ, soit le principe de complémentarité de Bohr, selon lequel deux modes de description mutuellement exclusifs sont nécessaires pour rendre compte des phénomènes physiques. Et deuxièmement, d'un point de vue beaucoup plus fondamental, c'est-à-dire d'un point de vue épistémologique, ce débat entre Heisenberg et Bohr illustrera deux approches différentes en science, d'une part une approche anti-réaliste et, d'autre part, une approche réaliste.

Présentons d'abord le point de vue de Heisenberg, que vise précisément la critique de Bohr. Le point essentiel, c'est que, dans la dérivation de ses relations, Heisenberg donne préséance à l'appareil analytique, ou au formalisme, de la MQ, illustrant ici une approche anti-réaliste. L'observation, réalisée à partir de l'expérience du microscope décrite plus haut, ne fait que confirmer les relations d'indétermination de Heisenberg, qui sont d'abord et avant une déduction de l'appareil analytique de la MQ. Il faut se rappeler que l'idée maîtresse qui a permis à Heisenberg de formuler ses relations s'inspire de l'affirmation de Einstein : « It is the theory which decides what we can observe ». Et, dans la même ligne de pensée, Heisenberg ajoutera :

We have a consistent mathematical scheme and this consistent mathematical scheme tells us everything which can be observed. Nothing is in nature which cannot be described by this mathematical scheme (Heisenberg in Jammer 1974 : 66).

Et cette approche anti-réaliste, qui met l'accent sur l'appareil analytique d'une théorie, mènera ultimement Heisenberg à associer la définition d'un concept physique à sa mesurabilité : si une théorie, comme la MQ, ne permet pas la mesure d'un concept physique, c'est qu'on ne peut l'observer et qu'en conséquence, il n'existe tout simplement pas ! On se souviendra que le concept physique de la trajectoire, qui suppose une connaissance simultanée et précise de la position et du momentum de la particule, n'est pas possible selon les RI de Heisenberg. Le concept physique de la trajectoire n'est donc pas observable et n'existe pas au niveau microscopique.

La critique de Bohr sera vive à l'égard du raisonnement de Heisenberg : « Mathematical clarity had in itself no virtue. (...) a complete physical explanation should absolutely precede the mathematical formulation. » (Bohr in Jammer 1974 : 66). Selon Bohr, le formalisme ne peut être qu'adéquat par rapport aux phénomènes physiques, mais ne peut en rendre compte ou en justifier l'existence.

L'explication physique, à laquelle se réfère Bohr et sur laquelle s'appuient, selon lui, les relations d'indétermination de Heisenberg, correspond à deux modes de description mutuellement complémentaires, soit celle des ondes et celle des particules, communément appelés la dualité onde-particule. Ce principe représente un aspect important de l'interprétation dite de Copenhague⁶.

Bien que Heisenberg ait dérivé ses relations à partir du formalisme de la MQ, Bohr démontrera que la dualité onde-particule en constitue un aspect important. À cet effet, Bohr affirme que le raisonnement de Heisenberg, notamment dans ses expériences de pensée, a recours aux relations de Broglie-Einstein, qui est l'expression par excellence de la dualité onde-particule :

It will have been noticed that in the derivation of the indeterminacy relations from the analysis of Heisenberg's thought-experiments, use has been made of the Einstein-de Broglie relations (...). These relations obviously connect wave attributes with particles attributes and thus express the wave-particle dualism. In fact, every derivation of the Heisenberg relations from the analysis of thought-experiments must somewhere have recourse to the Einstein-de Broglie equations, for otherwise the whole reasoning would remain classical and no indeterminacy relation could be derived. (Jammer 1974:67)

Pour démontrer ce point, Bohr lui-même évoque une expérience de pensée, où la dérivation des indéterminations de Heisenberg est impossible sans utiliser les relations de Broglie-Einstein. Sans entrer dans les détails, l'expérience consiste à faire passer une particule au travers une fente d'une certaine largeur. Mais compte tenu de la dualité onde-particule et de l'interaction de la particule avec la fente, qui provoque de la diffraction et de l'interférence, on ne peut obtenir les incertitudes sur la position et le momentum qu'en se référant aux relations de Broglie-Einstein.

⁶ Nous verrons cependant, dans la deuxième partie de ce texte, un point de vue beaucoup plus fondamental du principe de complémentarité de Bohr.

Bohr s'attaque finalement à une autre conclusion importante (cf. Jammer 1974 : 68-69), à laquelle est parvenu Heisenberg, qui soutient que la définition des concepts physiques en général se ramène essentiellement à leur mesurabilité. Selon Heisenberg, les relations d'indétermination expriment la limite de mesurabilité de concepts physiques comme la position ou le momentum. C'est faux, affirmera Bohr. Les relations d'indétermination expriment l'impossibilité, à l'échelle microscopique, du recours *simultané* de ces deux concepts physiques, qui correspondent à des modes de description mutuellement exclusifs et complémentaires. Mais, comme l'affirme le principe de complémentarité, ce recours à deux modes de description mutuellement exclusifs rend bien compte des phénomènes physiques, en particulier à l'échelle classique, comme le concept classique de la trajectoire, qui suppose la connaissance simultanée de la position et du momentum, deux modes de description mutuellement exclusifs ou complémentaires.

Dans la même note ajoutée à la fin de son article, dans laquelle il reconnaissait avoir omis, dans son expérience du microscope, un élément technique important, Heisenberg concédera également à Bohr que les indéterminations ne peuvent être déduites seulement à partir du formalisme, mais qu'il faut également tenir compte de la théorie des corpuscules et celle des ondes :

Above all, the uncertainty in our observation does not arise exclusively from the occurrence of discontinuities, but is tied directly to the demand that we ascribe equal validity to the quite different experiments which show up in the corpuscular theory on one hand, and in the wave theory on the other hand. (Heisenberg 1927 in WZ 1983:83)

En conclusion, il importe de voir qu'il s'agit là d'un débat de nature épistémologique, où la recherche du fondement des relations d'indétermination, relations fondamentales entre différents concepts physiques, mène à privilégier différentes approches. Avec Heisenberg, qui a dérivé ses relations de l'appareil analytique de la MQ, on peut dire qu'une approche anti-réaliste a été ici adoptée. La théorie défendant l'observation de certains phénomènes physiques, les expériences réalisées par Heisenberg, dans l'une desquelles, effectivement, le concept de trajectoire a été exclu, comme le prévoyait la théorie de la MQ, n'ont fait que renforcer son idée maîtresse. Et, à l'opposé, une approche réaliste où, selon Bohr, la dualité onde-particule de la matière, qui corres-

pond à deux modes de description mutuellement complémentaires, ont en fait dicté les relations d'indétermination⁷.

Bohr : principe de complémentarité

Dans cette partie, nous examinons d'abord le concept de la dualité onde-particule et les diverses expériences qui ont mené à son élaboration et à sa confirmation. Enfin, nous abordons le principe de complémentarité de Bohr, où un point de vue beaucoup plus fondamental que celui de la dualité onde-particule est présenté, notamment par les concepts de description spatio-temporelle et description causale. Nous nous référerons de même aux notions d'interaction entre système observateur et système observé et de quantum d'action, qui seront considérés comme des éléments importants de notre recherche du fondement de l'interprétation de Copenhague

i) dualité onde-particule

Le concept de la dualité onde-particule tire son origine d'une expérience réalisée en 1905 par Einstein, visant à rendre compte de l'effet photo-électrique. Einstein remettait ainsi en cause la théorie classique de l'électromagnétisme développée par Maxwell. Précisons qu'à la suite de ses travaux, notamment par la formulation de l'hypothèse de quantification de l'énergie, Max Planck, quant à lui, n'osait pas remettre en question l'entreprise de Maxwell, qui représentait rien de moins que l'*unification* (l'ultime but visé en physique!) des diverses théories relatives aux phénomènes électriques et magnétiques. Einstein, pour sa part, soumettra le rayonnement électromagnétique à l'hypothèse de Planck pour rendre compte de l'effet photo-électrique.

Rappelons très brièvement l'expérience de Einstein (cf. Omnès 1999 : 8, Jammer 1989 : 21-36). On a une plaque de métal sur laquelle est projeté un faisceau de lumière. Grâce à un dispositif électrique, on remarque que des électrons sont émis par la plaque. On fait toutefois l'observation

⁷ Dans la partie suivante du texte, j'examinerai davantage la dualité onde-particule. Nous serons en mesure de constater que ce concept a un statut beaucoup moins important (et même superficiel !). Et notre réflexion épistémologique portera sur un aspect plus fondamental.

suivante, qui contredit la théorie classique de l'électromagnétisme de Maxwell : en augmentant l'intensité du faisceau de lumière, le nombre d'électrons émis n'augmente pas. Par contre, si l'on tient compte de la fréquence de la lumière et qu'on l'augmente, le nombre d'électrons émis augmente. À partir de l'hypothèse de quantification de Max Planck, Einstein soutiendra que le faisceau de lumière est essentiellement composé de *quanta* d'énergie (désignés plus tard par le terme *photon*), laquelle énergie est déterminée en fonction de la constante de Planck et de la fréquence de la lumière. Contrairement à l'électromagnétisme classique, d'après lequel il aurait suffi d'augmenter l'intensité de la lumière, il faut plutôt tenir compte de la fréquence, qui doit atteindre un certain seuil pour que les quanta de lumière, ou photons, ait l'énergie nécessaire pour s'extirper de la plaque les électrons. Dès lors, on voit que la dualité onde-particule caractérise la nature de la lumière, qui présente bien sûr des propriétés ondulatoires mais aussi des propriétés corpusculaires en fonction du concept de *photon*, tel que défini par Einstein et auquel on peut associer une énergie et une impulsion.

Louis de Broglie, physicien français, effectuera le raisonnement inverse (cf. Omnès 1999 : 30-31; Jammer 1989 : 244-251). Si, en vertu du principe de la dualité onde-particule, on peut associer à une onde, telle que la lumière, des propriétés corpusculaires, il est alors possible, en vertu du même principe, d'associer à une particule, telle que l'électron, des propriétés ondulatoires. Louis de Broglie montrera en effet qu'une particule peut démontrer des propriétés ondulatoires, ce qui donnera naissance au concept d'« ondes de matière ». Une longueur d'onde λ est donc associée à une particule ayant une impulsion p selon l'équation formulée par de Broglie.

Pour confirmer l'hypothèse de Broglie, nous nous référons à deux expériences qui mettent en évidence les propriétés ondulatoires de l'électron. La première s'inspire directement de l'expérience de Thomas Young, effectuée en 1801, qui visait à observer les phénomènes de diffraction et d'interférence de la lumière. Nous effectuons la même expérience mais, cette fois-ci, avec des particules. Nous serons en mesure d'observer de la diffraction et de l'interférence, comme cela se produit avec de la lumière, ce qui prouve la nature ondulatoire des électrons. Décrivons brièvement le montage de l'expérience. Nous avons un diaphragme avec deux fentes et, de l'autre côté de ce diaphragme, nous avons un détecteur d'électrons. La première étape consiste à effectuer l'expérience avec une seule fente ouverte du diaphragme, l'autre étant fer-

mée. Nous projetons alors, en direction de l'unique fente du diaphragme, des électrons en nombre très élevé (et même en quantité continue... il s'agit alors d'une expérience de pensée). L'appareil de mesure indique alors que la distribution des électrons détectés correspond à une figure de diffraction. La deuxième étape de l'expérience est effectuée par la suite avec les deux fentes ouvertes du diaphragme et on projette, sur chacune d'elles, une quantité continue d'électrons. Le détecteurs d'électrons indique cette fois-ci une distribution d'électrons correspondant à une figure d'interférence, comme cela se produit lorsque de la lumière est projetée. En conséquence, compte tenu des phénomènes de diffraction et d'interférence observés, les deux premières étapes de cette expérience nous confirment bien la nature ondulatoire de l'électron. Et finalement, en troisième étape, qui constitue une preuve supplémentaire de la double nature de l'électron, nous voulons vérifier le fait qu'il est impossible de localiser dans cette expérience la particule avant qu'elle n'atteigne le détecteur. Nous maintenons alors, comme dans l'étape précédente, les deux fentes ouvertes du diaphragme sauf que nous projetons des électrons en direction d'une seule des deux fentes. L'appareil de mesure indique une distribution d'électrons correspondant à une figure d'interférence, comme à l'étape précédente, où des électrons étaient projetés vers les deux fentes. Cela veut dire en conséquence que les électrons, même s'ils sont projetés vers une seule fente, *interagissent avec les deux fentes* compte tenu de la figure d'interférence observée. Il n'est alors pas possible de dire par quelle fente sont passés les électrons, d'où l'impossibilité de les localiser. En somme, les différentes étapes de cette expérience inspirée de Young confirme bien l'hypothèse de Broglie, suivant laquelle la dualité onde-particule caractérise bien la nature des particules comme l'électron.

Une autre expérience réalisée en 1927 par Davisson et Germer a confirmé aussi les résultats de Broglie(cf. Jammer 1989 : 253-255). Cette expérience a trait à la diffusion d'électrons par une cible de nickel, un monocristal dont la structure atomique est répétitive, donc très simple. La surface de cette cible constitue donc un réseau d'atomes assez uniforme, notamment à cause de la distance uniforme qui sépare les atomes de nickel entre eux. Lorsqu'on projette des électrons sur cette cible, ils sont diffusés selon un angle précis, déterminé selon l'équation de Broglie, et cela suppose que ces électrons interagissent avec le réseau atomique de la surface de nickel. Si les électrons interagissaient un à un avec les atomes de nickel, ils seraient diffusés de manière aléatoire, dans tous les sens. Dans ce cas-ci, au contraire, l'angle précis selon lequel sont diffusés les

électrons suppose une interaction avec l'ensemble des atomes composant la surface de nickel, et la nature de cette interaction implique donc des propriétés ondulatoires des électrons.

ii) Principe de complémentarité

Lors d'une conférence intitulée « The quantum postulate and the recent development of atomic theory » (reproduit dans WZ 1983 : 87-126), présentée en 1927 dans le cadre d'un congrès qui a lieu à Como en Italie, Bohr expose pour la première fois, en détail, son célèbre principe, soit le principe de complémentarité.

Bohr fait tout d'abord référence à l'inévitable interaction qui a lieu, au niveau microscopique, entre le système observé et le système observateur :

Notwithstanding the difficulties which, hence, are involved in the formulation of the quantum theory, it seems, as we shall see, that its essence may be expressed in the so-called *quantum postulate*, which attributes to any atomic process an essential discontinuity, or rather individuality, completely foreign to the classical theories and symbolized by Planck's quantum of action. (...) Now, the quantum postulate implies that any observation of atomic phenomena will involve an interaction with the agency of observation not to be neglected. Accordingly, an independent reality in the ordinary physical sense can neither be ascribed to the phenomena nor to the agencies of observation. (Bohr in WZ 1983:88-89)

Nous avons ici l'essence même de la MQ, le « quantum postulate » comme écrit Bohr, qui correspond au quantum d'action de Planck tel que déduit à partir de son hypothèse de quantification de l'énergie. Rappelons que la théorie électromagnétique classique ne pouvait expliquer la distribution des fréquences du rayonnement du corps noir, notamment pour les fréquences élevées qui a mené au problème bien connu de la « catastrophe ultra-violet ». Planck a résolu ce problème en émettant son hypothèse de la quantification de l'énergie, laquelle hypothèse a mené à l'introduction du quantum d'action ou de la célèbre constante de Planck, qui ne pouvait d'aucune façon être déduite de la théorie classique. À la lumière de la citation de Bohr ci-dessus, il importe de comprendre qu'au niveau microscopique, c'est-à-dire à un niveau infiniment petit, il y a nécessairement interaction entre deux systèmes physiques, soit un observateur et un observé, à cause de la nature essentiellement *discrète* de l'énergie. Si, au contraire, l'énergie était émise de

façon continue, il serait alors possible d'envisager une quantité infiniment petite d'énergie lors du processus d'interaction entre système observateur et système observé, de sorte que cette interaction serait négligeable. Mais tel n'est pas le cas au niveau des phénomènes atomiques ou microscopiques, et ce, à cause du quantum d'action, le « quantum postulate », qui correspond, d'après Bohr, à la pierre angulaire de la MQ.

Compte tenu de cette inévitable interaction entre système observateur et système observé, en raison du quantum d'action, Bohr tirera des conséquences déterminantes par rapport au mode de description classique, ce qui le mènera à formuler son célèbre principe de complémentarité, qui constitue, avec les relations d'indétermination de Heisenberg, l'un des piliers de l'interprétation de Copenhague :

This situation has far-reaching consequences. On one hand, the definition of the state of a physical system, as ordinarily understood, claims the elimination of all external disturbances. But in that case, according to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time lose their immediate sense. On the other hand, if in order to make observation possible we permit certain interactions with suitable agencies of measurement, not belonging to the system, an unambiguous definition of the state of the system is naturally no longer possible, and there can be no question of causality in the ordinary sense of the word. The very nature of the quantum theory thus forces us to regard the space-time co-ordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as complementary but exclusive features of the description, symbolizing the idealization of observation and definition respectively. (Bohr *in* WZ 1983:89-90)

Nous avons ci-dessus l'essence même du principe de complémentarité de Bohr, qui soutient qu'une description spatio-temporelle et une description causale sont *simultanément* impossibles, remettant ainsi en cause le mode de description classique. Expliquons le raisonnement de Bohr en deux temps. Premièrement, la description causale correspond essentiellement, selon la MQ, à la description du développement de la fonction d'onde du système observé selon l'équation de Schrödinger. Cette description suppose aucune perturbation, qui viendrait de l'extérieur. Ainsi, fait essentiel, il y a conservation de l'énergie du système. Si, par contre, comme le prévoit le mode de description classique, il y a présence d'un agent observateur, le système observé est alors perturbé. Comme nous l'avons vu précédemment, au niveau microscopique, il y a nécessairement interaction entre les deux systèmes, et ce, à cause du quantum d'action. Cette inévitable interaction, qui se traduit par un échange d'énergie entre les deux systèmes, viole ainsi le principe de conservation de l'énergie que suppose une description causale du système observé. C'est

pourquoi Bohr remet en question, dans toute description causale, les concepts d'espace et de temps, à savoir des concepts que fait intervenir l'observateur même. Maintenant, dans un deuxième temps, effectuons le raisonnement inverse; supposons d'emblée une description spatio-temporelle, à savoir la présence d'un observateur. Si, dans le raisonnement précédent, c'était l'observateur, ou la description spatio-temporelle, qui était remis en question, c'est maintenant la causalité même qui est remis en question. La description causale n'est plus valide puisque l'observateur vient perturber le système observé en violant le théorème de la conservation de l'énergie.

Une autre façon d'illustrer le caractère mutuellement exclusif de ces deux descriptions serait de dire que l'une d'entre elles correspond à une description *statique*, soit la description spatio-temporelle où l'on fixe les coordonnées de l'espace et du temps du système observé. Quant à l'autre description, la description causale, elle est de nature *dynamique*, qui correspond à l'évolution, selon l'équation de Schrödinger, de la fonction d'onde associée au système observé.

En conséquence, on le voit bien, le principe de complémentarité de Bohr remet en cause le mode de description classique, qui suppose simultanément une description spatio-temporelle et une description causale. Cette remise en question du mode de description classique m'amènera, en conclusion, à une réflexion essentielle portant sur la relation entre l'observateur et son expérience.

Nous allons maintenant nous référer à une expérience de pensée, réalisée par Bohr, qui illustre le principe de complémentarité. Nous constaterons que pour obtenir une description spatio-temporelle et une description causale, il faut avoir recours à des montages expérimentaux qui sont différents et, même, qui s'excluent l'un par rapport à l'autre, d'où l'illustration, au niveau expérimental, du principe de complémentarité. Il s'agit d'un diaphragme avec une fente. Le but de l'expérience est de simplement faire les descriptions spatio-temporelle et causale d'une particule qui traverse la fente. En ce qui a trait d'abord à l'aspect spatio-temporel de l'expérience, il suppose une connexion *rigide* des parois du diaphragme qui nous assure de la position de la fente et de sa largeur. Nous connaissons donc les coordonnées spatio-temporelles de la particule, c'est-à-dire sa position et le laps de temps que la particule prend pour traverser la fente du diaphragme.

Ensuite, en ce qui a trait à la description causale du système, nous devons avoir, en vertu du principe de conservation, une connaissance de l'énergie. Comme on l'a vu, à cause du quantum d'action, lors du passage de la particule, il y a nécessairement interaction, soit un transfert d'énergie, avec les parois de la fente. Ce transfert d'énergie peut être connu, à partir d'un calcul simple, en considérant le transfert du moment linéaire de la particule aux parois de la fente. Mais ce transfert du moment linéaire ne peut être mesuré qu'avec une connexion *souple* des parois du diaphragme, et ce, contrairement à la connexion *rigide*, qui nous avaient permis une description spatio-temporelle de la particule traversant la fente. En conséquence, on est en mesure de constater qu'une description à la fois spatio-temporelle et causale nécessite des montages expérimentaux mutuellement complémentaires ou exclusifs l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire, dans ce cas particulier, une connexion des parois du diaphragme qui devrait être à la fois rigide et souple.

Nous allons maintenant nous interroger sur le fondement du principe de complémentarité de Bohr. Diverses réponses ont été proposées et nous allons examiner en particulier trois d'entre elles. La première, de loin la plus répandue, consiste à soutenir que la dualité onde-particule est le fondement ultime du principe de Bohr. Il s'agit même, selon eux, du fondement ontologique (!) du principe de complémentarité de Bohr, car la dualité onde-particule est un phénomène réel (!), ou plutôt observable, maintes fois confirmé par l'expérience de Einstein qui a rendu compte de l'effet photo-électrique ou par l'expérience des deux fentes de Young. Par exemple, rappelons que dans l'expérience des deux fentes de Young, les électrons interagissent avec les deux fentes compte tenu de la distribution des électrons détectés, qui forme une figure d'interférence. Alors, dans cette expérience, le volet « description causale » du principe de complémentarité de Bohr est illustré par l'interaction des électrons avec les deux fentes. Selon la dualité onde-particule, il s'agit de la nature ondulatoire des électrons. Donc, le premier volet du principe de complémentarité, la description causale, se fonde sur la nature ondulatoire des particules conformément au principe de la dualité onde-particule. Ensuite, quant à la deuxième composante du principe de Bohr, soit la description spatio-temporelle, elle correspond au moment où, dans l'expérience, l'électron est détecté. L'appareil de mesure, soit le détecteur d'électrons, correspond à l'observateur même et fixe les coordonnées spatio-temporelles de l'électron. Ainsi, lorsqu'il y a présence de l'observateur ou de l'appareil de mesure, les propriétés corpusculaires de l'électron sont mis en évidence. La deuxième composante du principe de complémentarité, la description

spatio-temporelle, est alors illustrée à cette étape de l'expérience, où l'électron, qui est détecté, est traité comme une particule. En conséquence, on voit, à partir de cette expérience, que la dualité onde-corpuscule correspond à chacune des descriptions du principe de complémentarité de Bohr.

Selon nous, c'est faire preuve d'un réalisme naïf que de considérer la dualité onde-particule comme un fondement de nature « ontologique » du principe de complémentarité. D'abord, nous considérons que la dualité onde-particule n'est qu'un cas particulier, ou superficiel, du principe de complémentarité, dont les notions de descriptions causale et spatio-temporelle s'avèrent beaucoup plus fondamentales. Ensuite, comment peut-on attribuer un statut ontologique à la dualité onde-particule? Il faut déjà disposer de théories pour observer ce phénomène. Par exemple, dans notre expérience citée ci-dessus, l'interaction des électrons avec les deux fentes, mettant en évidence l'aspect ondulatoire de la matière, s'appuie essentiellement sur la mécanique ondulatoire, notamment sur le concept de fonction d'onde développé par Schrödinger. Selon moi, donc, la dualité onde-particule, bien qu'il s'agisse d'un phénomène observé, ne constitue pas le fondement ultime et, encore moins, ontologique du principe de complémentarité de Bohr.

Une deuxième explication du principe de complémentarité, que nous avons évoquée plus haut, nous laisse un peu sur notre faim. Elle consiste tout simplement à dire que les descriptions causale et spatio-temporelle du principe de Bohr correspondent à des descriptions dynamique et statique, descriptions qui s'avèrent donc mutuellement exclusives et complémentaires, comme l'entend le principe de Bohr. Rappelons que la description dynamique correspond à la description causale, qui, elle, correspond au développement de la fonction d'onde tel que décrit par l'équation de Schrödinger. Et, bien sûr, la description statique correspond à la description spatio-temporelle, où le système observateur fixe les coordonnées spatio-temporelles du système observé. Je considère qu'il s'agit là d'une explication minimale qui peut difficilement servir de fondement au principe de Bohr. Cette explication, de nature logique en quelque sorte, est minimale car elle est fondée sur la dualité statique/non statique et apporte finalement peu d'information.

Dans la recherche d'un fondement au principe de complémentarité de Bohr, je crois que la clé de la solution réside essentiellement dans l'interaction entre système observateur et système observé.

Et ultimement, cette interaction ne peut être expliquée que par le quantum d'action, le « postulat quantique » comme disait Bohr, qui constitue l'origine et la pierre angulaire de toute la physique quantique. Comme nous l'avons déjà expliqué, selon l'hypothèse de la quantification de l'énergie formulée par Max Planck, l'énergie est émise en quantité discrète. Ne pouvant considérer, au niveau microscopique, une quantité d'énergie infiniment petite, il n'est donc pas possible de négliger l'interaction entre deux systèmes physiques. Cette interaction ou cette perturbation se traduit par la violation du principe de conservation de l'énergie du système observé, d'où l'impossibilité d'une description causale du système observé à cause de la présence d'un système observateur.

Rappelons, en terminant, la critique qu'a adressée Bohr à Heisenberg. Heisenberg semble remettre en question les paramètres utilisés dans la description spatio-temporelle (x, y, z, t) et ceux de la description causale (E, p_x, p_y, p_z) pour rendre compte des phénomènes classiques. Bohr affirme, pour sa part, que ce ne sont pas les paramètres qu'il faut remettre en question, mais plutôt le type d'explication classique lui-même, à savoir le mode de description classique fondé sur l'usage simultané de ces paramètres. C'est ce que montrent exactement les relations d'indétermination, qui interdisent cet usage simultané. Il ne faut pas chercher de nouvelles variables ou de nouveaux paramètres, qui seraient conciliables entre eux et qui justifieraient le mode d'explication classique.

iii) Conclusion

Les relations d'indétermination de Heisenberg et le principe de complémentarité de Bohr, les deux piliers de l'interprétation de Copenhague, soutiennent qu'il n'est pas possible de procéder simultanément à une description spatio-temporelle et à une description causale, remettant ainsi en question le type d'explication classique. Précisons que cette impossibilité est fondée sur l'interaction entre le système observateur et le système observé, laquelle interaction s'explique, comme on l'a montré, par le quantum d'action, concept fondateur de la MQ.

La description de l'interprétation de Copenhague m'amène toutefois à une réflexion encore plus fondamentale, qui porte sur l'observateur et son expérience. Sur la base du principe de complémentarité, qui interdit une description à la fois spatio-temporelle et causale, ne peut-on pas affirmer que l'observateur, établissant un lien de causalité entre les phénomènes, est finalement le constructeur de son expérience? À la lumière de la réflexion de Bohr et de Heisenberg, je tends maintenant à privilégier une approche anti-réaliste ou, mieux encore, une approche constructiviste, et ce, au détriment d'un réalisme naïf...

2.1.2. Einstein : inconsistance et incomplétude de la MQ

Inconsistance : invalidité des relations d'indétermination

Dans l'histoire de la mécanique quantique et de ses diverses interprétations, le débat qui a lieu entre Bohr et Einstein est incontournable. C'est aux cinquième et sixième éditions du célèbre Congrès Solvay, tenus à Bruxelles en 1927 et en 1930, que culminera le débat entre les deux célèbres physiciens. C'est en des termes élogieux que Max Jammer décrit l'impact de ce débat sur l'histoire de la physique :

For it was one of the great scientific debates in the history of physics, comparable, perhaps, only to the Newton-Leibniz controversy of the early eighteenth century. In both cases it was a clash of diametrically opposed philosophical views about fundamental problems in physics; and as the famous Leibniz-Clarke correspondance (1715-1716) – « peut-être le plus beau monument que nous ayons des combats littéraires » (Voltaire)- was only a brief manifestation of the profound divergence of opinions between Newton and Leibniz, so were the discussions between Bohr and Einstein in the lobby of the Hotel Metropole in Brussels only the highlight of a debate which went on for many years, though not in the form of a direct dialogue. (Jammer 1974:120)

Nous savons que l'interprétation de Bohr, présentée à la conférence de Como en 1927, soutient qu'il n'est pas possible de procéder à une description à la fois causale et spatio-temporelle à cause de l'interaction entre système observé et système observateur. Il n'est donc pas possible, de la part d'un observateur, d'établir un lien de cause à effet entre les phénomènes à l'échelle microscopique. Cela remet donc en cause la stricte causalité dans la description des phénomènes en

physique, idée chère à Einstein, comme en témoigne l'extrait de la lettre suivante envoyée à Max Born :

That question of causality worries me also a lot. Will the quantum absorption and emission of light ever be grasped in the sense of complete causality or will there remain a statistical residue? I have to confess, that I lack the courage of a conviction. However I should be very, very loath to abandon complete causality (Einstein *in* Jammer 1974:122)

C'est donc directement à l'interprétation de Bohr que s'attaquera Einstein. Nous verrons notamment qu'il remet en question la consistance de la MQ en réfutant, à partir de diverses expériences de pensée, les relations d'indétermination de Heisenberg qui constituent évidemment le fondement essentiel de l'interprétation de Copenhague formulée par Bohr.

Louis de Broglie, l'un des premiers physiciens à prendre la parole au cinquième Congrès Solvay en 1927, se réfèrera principalement, dans sa conférence, aux travaux de Schrödinger et de Born. Au grand plaisir de Einstein, de Broglie affirme pouvoir définir une approche de nature déterministe en MQ. À la fonction d'onde telle que définie par Schrödinger, de Broglie y associe désormais deux interprétations : la première concerne les travaux de Born et considère la fonction d'onde comme une *onde de probabilité*, soit une onde en vertu de laquelle il est possible de calculer l'amplitude de probabilité pour la position de la particule. La deuxième interprétation proposée par de Broglie, qui constitue en fait l'élément original de sa théorie, considère la fonction d'onde de Schrödinger comme une *onde pilote*. De Broglie a élaboré une formule (cf. Jammer 1974 : 110), qui fait intervenir la fonction d'onde de Schrödinger, selon laquelle il est possible, si les conditions initiales du système sont connues, de connaître la position et la vitesse de la particule en tout temps. Comme nous l'avons mentionné, Einstein ne peut, de prime abord, qu'accueillir favorablement les travaux de Broglie.

Toutefois, sur la base de travaux effectués par Enrico Fermi, publiés dans la revue *Zeitschrift für Physik* en 1926, Wolfgang Pauli réfutera les conclusions auxquelles est parvenu de Broglie, ce qui coupera court aux espoirs entretenus par Einstein à l'égard de cette théorie. Bien que de Broglie ait tenté de s'opposer aux arguments de Pauli, qui s'appuient sur des résultats pourtant bien établis par Fermi, il renoncera à sa théorie et joindra finalement les rangs des orthodoxes, soit ceux qui adhèrent à l'interprétation de Copenhague, ce qui n'inclut évidemment pas Einstein.

Einstein, à son tour, proposera une interprétation de la fonction d'onde de Schrödinger. Selon lui, contrairement aux positions de Bohr et de Heisenberg, la fonction d'onde ne peut être associée à une seule particule et rendre compte d'un processus individuel. Einstein propose au contraire une *interprétation d'ensemble*, selon laquelle la fonction d'onde de Schrödinger rend compte d'un *ensemble* de particules. Cette interprétation a entre autres un impact fondamental sur la notion de probabilité en MQ. Il faut comprendre que, selon l'interprétation de Bohr et de Heisenberg, la probabilité que la particule soit à un endroit précis, telle que définie par Born, correspond à une *potentialité* (dans le sens aristotélicien du terme ; cf. Jammer 1974 : 119). Selon l'interprétation d'Einstein, d'après laquelle la fonction d'onde est associée à un ensemble de particules, la probabilité correspond plutôt à la notion de *fréquence relative*. Autrement dit, la probabilité est établie en fonction de la distribution des particules dans l'espace. Par contre, l'interprétation de Copenhague prétend rendre compte du processus d'une seule particule représentée par une fonction d'onde, continûment répartie dans l'espace, selon laquelle la dite particule est *potentiellement* quelque part.

De prime abord, la probabilité, qui s'appuie sur la notion de fréquence relative, telle que définie par Einstein, semble beaucoup plus acceptable pour la plupart des physiciens. Et, plus fondamental encore, elle ouvre la voie à la théorie des paramètres cachés, un courant de pensée important dans l'interprétation de la MQ. Dans l'interprétation telle que l'entendent Bohr et Heisenberg, Einstein ne peut se résoudre à comprendre qu'il existe une sorte de « mécanisme d'action à distance », qui a pour résultat la réduction du paquet d'ondes et qui empêche ainsi que la particule, représentée par une onde continûment répartie dans l'espace, puisse apparaître à plus d'un endroit.

Après avoir proposé son interprétation de la fonction d'onde de Schrödinger, Einstein veut démontrer l'invalidité des relations d'indétermination de Heisenberg, ce qui montrerait l'inconsistance de la MQ telle que conçue selon l'interprétation de Copenhague. Bohr et Heisenberg, rappelons-le, soutiennent qu'il n'est pas possible d'appliquer les notions classiques, fondées sur la continuité et la stricte causalité, pour rendre compte des phénomènes microscopiques et

qu'en conséquence, il n'est pas possible de procéder simultanément à une description causale et spatio-temporelle. Mais Einstein l'entend autrement :

Einstein, on the other hand, had the advantage that if he could disprove the Heisenberg relations by a closer analysis of the mechanics of one single thought-experiment, Bohr's contention of the incompatibility of a simultaneous causal and space-time description of phenomena and with it his whole theory would be refuted. Einstein attack was therefore directed toward demonstrating that it is possible to provide an exact space-time specification of an individual process together with a detailed account of the balance of the energy and momentum transfer involved (causal description). (Jammer 1974:127)

Au cinquième congrès Solvay, Einstein présente en 1927 deux expériences de pensée, mettant ainsi à l'épreuve les relations d'indétermination de Heisenberg. Décrivons ici très brièvement ces expériences. Tout d'abord, les deux expériences de Einstein font intervenir, encore une fois, des diaphragmes munis de fentes. Dans la première de ces expériences, Einstein place devant la fente du diaphragme un dispositif mobile à partir duquel on peut déterminer avec précision le momentum du photon lorsqu'il passe dans la fente du diaphragme. Ensuite, la largeur de la fente pouvant être arbitrairement petite, nous avons donc, simultanément, une mesure précise de la position de la particule et de son momentum, violant ainsi la première relation de Heisenberg. Erreur, selon Bohr. Car la deuxième relation de Heisenberg soutient qu'il est impossible de déterminer avec certitude le transfert d'énergie, dans un intervalle de temps donné, au dispositif mobile. La description causale, soit le contrôle du couple énergie-momentum, avec une description spatio-temporelle est donc impossible dans cette première expérience. Maintenant, en ce qui concerne la deuxième expérience, Einstein soutient qu'il est possible de déterminer précisément le momentum de la particule à partir de l'analyse de la figure de diffraction produite sur un écran. Bien sûr, soutient Bohr, mais en déterminant simultanément la position de la particule, en vue de réfuter la première RI de Heisenberg, on détruit alors la figure de diffraction, phénomène qui permettait justement de déterminer le momentum de la particule. Einstein doit finalement concéder à Bohr que, sur la base de cette expérience, il ne peut, encore une fois, réfuter la première relation de Heisenberg. Il est intéressant de noter que l'expérience illustre très bien qu'il est impossible d'envisager simultanément l'aspect corpusculaire et ondulatoire d'un phénomène microscopique.

L'ultime tentative de Einstein de démontrer l'inconsistance de la MQ selon l'interprétation de Copenhague sera présentée au sixième congrès Solvay tenu en octobre 1930. L'expérience en

question, bien connue sous le nom de la « boîte à photons », s'appuie essentiellement sur des principes de la théorie de la relativité. Il est intéressant de noter qu'Einstein se réfère à sa propre théorie, la théorie de la relativité, pour remettre en question la MQ telle qu'élaborée par Bohr et Heisenberg. Mais, dans une certaine mesure, indique Einstein, c'est l'idée de Bohr lui-même lorsque celui-ci a comparé, dans un article paru dans *Naturwissenschaften* en 1929, la MQ à la théorie de la relativité en se référant entre autres aux notions fondamentales de quantum d'action et de la finitude de la vitesse de la lumière :

Planck's discovery of the quantum of action, he (Bohr) maintained, has confronted us with a situation similar of the discovery of the finiteness of the velocity of light; for just as the smallness of ordinary velocities in macromechanics makes it possible to separate sharply our conception of space from that of time, so the smallness of Planck's quantum of action makes it possible to provide simultaneously a space-time and a causal description of ordinary macroscopic phenomena. But in the treatment of microphysical processes the reciprocity of complementarity of the measuring results cannot be ignored, just as in high-speed phenomena the relativity of observation cannot be neglected in questions concerning simultaneity. *The restrictions expressed by Heisenberg's relation guarantee the consistency of QM as the impossibility of a super-light-velocity of the transmission of signals safeguards the consistency of the relativity theory.* (Jammer 1974:131)

Le fait de réfuter les RI de Heisenberg sur la base des principes de la théorie de la relativité serait considéré, selon l'expression d'Einstein lui-même, comme un « coup de maître » compte tenu de l'analogie faite par Bohr entre la MQ et la théorie de la relativité. Mais, au grand désarroi d'Einstein, sa propre stratégie se retournera contre lui-même, comme le démontrera Bohr. Au prétendu « coup de maître », on assistera plutôt à un « effet boomerang » contre le principal intéressé !

Expliquons maintenant, très brièvement, les principes essentiels de l'expérience ainsi que la faille qu'a relevée Bohr dans le raisonnement d'Einstein. Une boîte, dont les parois intérieures sont parfaitement réfléchissantes, contient une quantité déterminée de rayonnement ou de photons. La boîte a une ouverture qui est fermée par un dispositif contrôlé par une horloge. En déclenchant le dispositif qui ouvre la boîte pour un intervalle de temps précis et en déterminant, grâce à un autre dispositif, la variation de la masse de la boîte, soit avant et après son ouverture, il est possible de déterminer l'énergie du rayonnement, qui s'est échappé de la boîte, en se référant à la relation masse-énergie de la théorie de la relativité. Ainsi, résumée très sommairement, cette expérience montre qu'il est possible d'avoir une connaissance simultanée et précise de l'énergie de la radia-

tion et du moment précis où elle s'est échappée de la boîte, ce qui viole ainsi la deuxième relation de Heisenberg. Toutefois, dans le processus de l'expérience, en particulier lors de la pesée de la boîte, il y a déplacement de l'horloge. Et, selon Bohr, la faille du raisonnement se situe précisément là : le déplacement d'une horloge dans un champ gravitationnel implique, selon la théorie de la relativité, une variation (ou, plus précisément, une dilatation) de tout intervalle de temps. Alors, dans cette expérience, étant donné qu'on ne tient pas compte de cette variation, on n'a pas la connaissance précise du temps, et ce, selon la théorie formulée par Einstein, la théorie de la relativité. Alors, on peut considérer que la propre théorie d'Einstein s'est retournée contre lui-même en invalidant la conclusion de son expérience de pensée.

En conclusion, cette incapacité, de la part d'Einstein, d'invalider les relations d'indétermination de Heisenberg lors des cinquième et sixième congrès Solvay marque un point tournant dans cet important débat sur l'interprétation de la MQ. D'un débat qui a porté sur la *consistance* de la MQ, on passe maintenant à un débat qui va porter sur la *complétude* de la MQ¹.

Incomplétude : paradoxe ERP

Dans cette partie, nous allons tout d'abord montrer comment nous pouvons considérer l'expérience de la boîte à photons, décrite précédemment, comme un élément précurseur de l'expérience menant au paradoxe logique EPR. Finalement, dans la partie suivante, nous allons traiter en détail du paradoxe même, celui exposé dans l'article *Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?* (Wheeler & Zurek 1983² : 138-141) publié en 1935 par Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Mais avant tout, nous allons voir, à partir d'un article publié peu avant, soit en 1931, qu'Einstein a vraiment endossé la validité des relations d'indétermination, et ce, dans une mesure que ne pouvait même pas envisager l'auteur lui-même des relations, Heisenberg.

¹ En terminant, à titre d'information seulement, compte tenu qu'il a été souvent question de la relation de commutation énergie-temps, nous ne pouvons accorder à celle-ci le même statut qu'à la relation position-momentum. Est-il vraiment possible d'associer au temps un opérateur hermitique? Voir Jammer 1974 : 141

² Compte tenu que nous nous référons souvent à cet ouvrage, nous utilisons tout simplement l'abréviation WZ 1983.

i) *validité des relations d'indétermination de Heisenberg*

Heisenberg a toujours soutenu que ses relations d'indétermination ne s'appliquaient que dans les cas de prédictions, et non à la connaissance d'événements du passé. Par exemple, il est impossible, à un temps ultérieur et déterminé, d'avoir la connaissance à la fois de la position et du momentum d'une particule. Mais rien n'interdit, du moins en ce qui concerne les relations d'indétermination, que l'on ait une connaissance de ces paramètres par rapport à un événement du passé. Dans un article publié en 1931, en collaboration avec Richard C. Tolman et Boris Podolsky, *Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics*, Einstein prétend le contraire :

The purpose of the present note is to discuss a simple ideal experiment which shows that the possibility of describing the past path of one particle would lead to predictions as to the future behavior of a second particle of a kind not allowed in the quantum mechanics. It will hence be concluded that the principles of quantum mechanics actually involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events (WZ 1983 : 135)

Décrivons très brièvement l'expérience de pensée à laquelle font référence les auteurs. Nous avons une boîte avec deux ouvertures, A et B, fermées par des dispositifs. Le photon sortant de B a un parcours beaucoup plus long que celui sortant de A. On croit pouvoir avoir une connaissance simultanée et précise de l'énergie de la particule sortant de B et du moment précis où elle aura atteint l'observateur, connaissance qui va à l'encontre de la deuxième relation de Heisenberg, en déterminant, à partir de l'effet Doppler, le momentum de la particule A. Mais en fait, Einstein démontrera que la connaissance du momentum de la particule A, qui atteint en premier l'observateur et qui constitue donc un événement du passé par rapport à l'arrivée de la particule B, n'est pas possible. Même si l'on se réfère à l'effet Doppler, la particule sortant de A n'est pas pour autant soustraite, durant son parcours, à la première relation d'indétermination de Heisenberg, qui interdit la connaissance simultanée et précise de la position et du momentum de la particule en question. On voit donc que les relations de Heisenberg s'appliquent autant à des événements du passé autant qu'à ceux du futur.

ii) De la boîte à photon au paradoxe EPR

Nous allons maintenant aborder, sous un nouvel angle, l'expérience de la boîte à photons pour montrer qu'elle constitue en partie le fondement de l'article présentant le paradoxe EPR. Comme on l'a vu, Einstein n'a pas réussi à démontrer l'inconsistance de la MQ à partir de cette expérience; il va donc essayer d'en tirer un paradoxe logique qui va remettre en question non seulement un aspect de la MQ, comme l'avait constitué la tentative de rejeter les relations d'indétermination de Heisenberg, mais bien toute celle-ci.

Décrivons très sommairement cette expérience. Encore une fois, nous avons une boîte avec une petite ouverture fermée par un dispositif relié à une horloge. Également, encore une fois, il est possible de déterminer la masse de cette boîte. Rappelons qu'en déterminant la différence de la masse de la boîte avant et après que ne s'échappe le photon, il est possible de déterminer son énergie en utilisant la relation masse-énergie de la théorie de la relativité. Toutefois, lorsque nous déterminons la masse de la boîte, ce processus implique un déplacement de l'horloge dans le champ gravitationnel, ce qui, selon la théorie de la relativité, provoque une variation du temps. C'est d'ailleurs sur cette base que Bohr avait réfuté la conclusion de Einstein qui soutenait l'invalidité des relations de Heisenberg. Maintenant, dans la nouvelle version de son expérience, l'innovation de Einstein consiste à apporter justement une correction au temps compte tenu du déplacement de l'horloge. Il est donc possible de prédire, d'une part, le moment où le photon arrivera à la cible et, d'autre part, son énergie.

En fait, dès 1931, à la suite de cette petite modification de son expérience, Einstein a tous les éléments pour élaborer, quatre ans plus tard, le paradoxe ERP. Il est essentiel de comprendre que l'élément clé du raisonnement correspond au fait, comme nous l'avons montré, que la boîte en question, après que le photon en soit sorti, nous permet de prédire soit l'énergie de la particule soit le moment où elle arrive à la cible. De façon plus générale, cela veut dire qu'un système physique (la boîte), après avoir interagi avec un autre (le photon), permet de faire des prédictions relatives à certains de ses paramètres physiques, comme l'énergie et le temps. La seule différence qu'on peut noter dans le célèbre article de 1935 correspond au fait que le système physique représenté par une boîte est tout simplement remplacé par une deuxième particule.

Dans sa correspondance avec Paul Ehrenfest et Paul Epstein, Einstein exprime en 1931 le même raisonnement et conclut que la MQ est une description inadéquate. Notons qu'ici, il n'emploie pas encore le terme « incomplet », n'ayant pas encore défini le critère de complétude d'une théorie physique.

Without in any way interfering with the photon between its escape and its later interaction with suitable measuring instruments, we are thus able to make accurate predictions pertaining *either* to the moment of its arrival *or* to the amount of energy liberated by its absorption. Since, however, according to the quantum-mechanical formalism, the specification of the state of an isolated particle cannot involve both a well-defined connection with the time scale and an accurate fixation of the energy, it might thus appear as if this formalism did not offer the means of an adequate description (Einstein *in* Jammer 1974:170-171)

Il vaut peut-être la peine de citer un autre passage de Max Jammer, très éclairant, qui commentent le raisonnement de Einstein sur la base d'une lettre qu'il a adressée expressément à Epstein en 1931 :

Since thus *either* the energy (or momentum) *or* the exact time of arrival (or position) of the photon may be predicted by choice, *both* attributes have to be ascribed to the photon, for, after all, the photon is a physical reality whose properties cannot depend on the discretion of a distant observer. The only logical alternative - that a subsequent measurement performed on B can *physically* affect the receding from B- seemed to Einstein unacceptable, for such an assumption would imply an action-at-a-distance or an action propagated with a velocity larger than c . Such an assumption, he wrote to Epstein, though logically possible was against his physical intuition to such an extent that he could not take it seriously - quite apart from the fact that one cannot form any clear conception about the structure of such process (Jammer 1974:173-174).

En somme, dans les deux passages cités ci-dessus, nous avons effectivement les éléments essentiels sur lesquels s'appuie l'article publié en 1935 : (i) l'expérience en question; (ii) les célèbres critères, dont le critère de la réalité, en vertu desquels sera déduit le fameux paradoxe logique. Et à bien y regarder, en particulier dans la deuxième citation, nous avons même la raison, du moins en partie, qui explique qu'il y a un mur entre, d'une part, Einstein et, d'autre part, Bohr et Heisenberg qui défendent l'interprétation de Copenhague. Comme nous le verrons en conclusion, c'est peut-être à cause de son *intuition physique* même qu'Einstein ne peut envisager que difficilement l'interprétation de Copenhague.

iii) Paradoxe EPR

Maintenant, attaquons-nous directement au célèbre article en question publié en 1935 par Einstein, Podolsky et Rosen, *Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?* (WZ 1983 : 138-141) Les trois auteurs y définissent essentiellement deux critères importants. Le premier a trait à la complétude d'une théorie physique :

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one : *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness (WZ 1983: 138)

Le deuxième énoncé formulé est le célèbre critère de réalité, sur lequel, on le verra, portera le débat fondamental sur la validité ou non de l'argument des trois auteurs. Voici ce critère, tel que présenté par les auteurs :

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e. with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity. (WZ 1983: 138)

Ensuite, sur la base de ces deux critères, Einstein, Podolsky et Rosen font le raisonnement suivant, dont une seule des deux alternatives présentées sera la principale conclusion :

From this follows that either (1) *the quantum mechanical description of reality given by the wave function is not complete* or (2) *when the operators corresponding to two physical quantities do not commute the two quantities cannot have simultaneous reality*. For if both of them had simultaneous reality – and thus definite values – these values would enter into the complete description, according to the condition of completeness. If then the wave function provided such a complete description of reality, it would contain these values; these would then be predictable, This not being the case, we are left with the alternatives stated. (WZ 1983: 138)

L'étape suivante consiste à présenter une expérience, fondée en grande partie sur l'expérience de la boîte à photon décrite précédemment, qui permettra de démontrer l'invalidité de la deuxième proposition de la citation ci-dessus, permettant donc de soutenir la première proposition, soit que la MQ est une théorie incomplète.

Décrivons maintenant, très brièvement, l'expérience en question. Comme nous l'avons déjà mentionné, la seule différence significative, par rapport à l'expérience précédente, est que la boîte en question a été remplacée par une autre particule³. Nous avons donc deux particules, dont l'état initial, pour les deux, est connu. Précisons qu'à ce moment, les deux particules sont suffisamment éloignées l'une de l'autre pour qu'il n'y ait aucune interaction. Avec une énergie et un momentum définis, les deux particules se dirigent l'une vers l'autre. Il y a alors, à un moment précis, interaction entre les deux particules, formant ainsi un système combiné. Finalement, après interaction, chaque particule retourne à sa position initiale. À partir de l'équation de Schrödinger et en connaissant, comme nous l'avons précisé, les paramètres initiaux, il est possible de calculer la fonction d'onde du système, c'est-à-dire la fonction d'onde qui s'applique à chaque particule. Finalement, à partir de la fonction d'onde du système, Einstein, Podolsky et Rosen peuvent prédire, compte tenu qu'il n'y plus interaction entre les deux particules, la position et le momentum de la deuxième particule en mesurant la position de la première particule et son momentum. En vertu du critère de réalité établi précédemment par les auteurs, s'il a été possible, à partir de la théorie, de prédire la position et le momentum de la deuxième particule, on peut soutenir que ces paramètres physiques correspondent effectivement à des éléments de réalité qui caractérisent la deuxième particule.

Rappelons que notre but était d'invalider la proposition (2) décrite dans la citation ci-dessus pour que la proposition (1) soit la seule alternative possible, c'est-à-dire la proposition selon laquelle la MQ est une théorie incomplète. Et effectivement, si l'on suit le raisonnement des trois auteurs et si, surtout, on adopte le critère de réalité, force est de constater que la position et le momentum correspondent à des éléments de réalité liés à la deuxième particule, qui sont pourtant des paramètres physiques dont les opérateurs ne commutent pas.

La critique de Bohr de l'argumentation du célèbre article des trois auteurs sera cinglante et visera en particulier Einstein. Mais avant, il vaut la peine de citer le passage de l'article où Einstein constate qu'il semble très paradoxal, d'où le fameux paradoxe, d'envisager une autre alternative allant contre le critère de réalité et, plus encore, contre sa propre intuition physique :

³ Selon Jammer (1974 : 174-178), l'idée de remplacer la boîte par une seconde particule serait peut-être le fruit d'une réflexion de Karl Popper, qui a fait parvenir à Einstein, l'année précédente, un article dans lequel était évoqué cette idée.

One could object to this conclusion on the grounds that our criterion of reality is not sufficiently restrictive. Indeed, one would not arrive at our conclusion if one insisted that two or more physical quantities can be regarded as simultaneous elements of reality *only when they can be simultaneously measured or predicted*. On this point of view, since either one or the other, but not both simultaneously of the quantities P and Q can be predicted, they are not simultaneously real. This makes the reality of P and Q depend upon the process of measurement carried out on the first system, which does not disturb the second system in any way. No reasonable definition of reality could be expected to permit this. (WZ 1983:140)

Dans un commentaire formulé en 1967 par Léon Rosenfeld, Einstein y exprime la même pensée, mais de façon beaucoup plus précise et concise :

But is it not very paradoxical? How can the final state of the second particle be influenced by a measurement performed on the first, after all physical interaction has ceased between them? (WZ 1983 : 137)

Bohr (WZ 1983 : 145-151) s'attaque finalement au critère de réalité, tel que défini par Einstein, qui constitue l'élément central sur lequel s'appuie toute l'argumentation de l'article de 1935. En fait, selon Bohr, Einstein aurait peut-être dû se méfier davantage de son intuition physique, développé surtout en fonction de la physique classique. Car, en ce qui concerne les phénomènes microscopiques et à la MQ qui les décrit, les concepts qui y sont élaborés sont pour la plupart contre-intuitifs, c'est-à-dire contre l'intuition naturelle. Ainsi, Bohr rejettera le critère de la réalité sur la base d'un élément précis, qui semble pourtant aller de soi justement en fonction de l'intuition physique commune :

The expression « without in any way disturbing a system » as used by Einstein, Podolsky and Rosen in their criterion of reality, contains an ambiguity : True, no mechanical disturbance is exerted on particle II : but since the conditions defining the possible types of prediction concerning particle II constitute an inherent element of the description of any phenomenon to which the term « physical reality » can be properly attached, and since these conditions, as we have seen, depend on whether q_1 or p_1 is being measured, the conclusion of the three authors is not justified. (WZ 1983 : 148 ; Jammer 1974:196)

Le critère défini par Einstein semble donc comporter une faille, du moins en ce qui concerne les phénomènes microscopiques. Et l'élément clé de cette réfutation est précisément, comme nous l'avons abordé dans un chapitre précédent de ce mémoire, *l'inévitable relation ou interaction entre système observé et système observateur*. En MQ, aussi paradoxal que cela puisse nous

paraître, *il n'est pas possible* de séparer le système qui effectue la mesure du système mesuré. L'état d'un système physique, décrit formellement par une fonction d'onde ou par une matrice, comprend autant le système observateur, que ce soit un appareil de mesure ou autre, que le système observé, tel qu'une particule. Einstein a donc tort lorsqu'il affirme pouvoir effectuer une mesure sans perturber le système physique dont il est question ici.

En conclusion, le critère de réalité d'Einstein, de nature épistémologique, en ce sens qu'il porte sur les conditions de la connaissance du réel, est battu en brèche. La théorie de la MQ, telle qu'envisagée par Bohr et Heisenberg par le biais de l'interprétation de Copenhague, demeure alors valide, et ce, autant sur le plan de la consistance de la théorie que sur le plan de sa complétude.

2.2 Interprétation de David Albert

Dans cette partie, nous présentons l'interprétation de David Albert. Mais, au préalable, il est essentiel de décrire quelques théories, comme celle de John von Neumann et celle de Hugh Everett III, pour mieux comprendre l'émergence de l'interprétation d'Albert.

2.2.1. Von Neumann : la théorie de la mesure et le postulat de projection

Comme nous l'avons déjà affirmé, John von Neumann a très bien défini, sous forme axiomatique, le formalisme de la MQ dans son ouvrage *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* publié en 1932. Par le fait même, en vertu du postulat de projection, il a aussi établi une théorie de la mesure, qui constituera la référence par excellence en la matière et qui, en conséquence, sera l'objet de nombreux commentaires. La théorie de la mesure, telle que formulée par von Neumann, fait intervenir deux processus physiques en vertu desquels on peut considérer « l'acte de mesure » comme, essentiellement, une interaction entre un système observateur et un système observé. Le premier processus est un changement discontinu et non causal, provoqué par l'acte

de mesure en soi, c'est-à-dire par le système ou l'appareil observateur. Von Neumann identifie ce processus à des « changements arbitraires dus aux mesures » <*willkürliche Veränderungen durch Messungen*>. Quant au deuxième processus, qui concerne le système observé et à son évolution telle que décrite par l'équation de Schrödinger, il est continu et causal (lois de conservation). Von Neumann parle dans ce cas-ci de « changements automatiques » <*automatische Veränderungen*>. En somme, c'est par ces deux processus physiques qu'une mesure est essentiellement définie comme une interaction entre un système observateur et un système observé.

Décrivons brièvement les cinq postulats de la théorie de von Neumann, ce qui nous permettra d'aborder précisément le postulat de projection, qui représente l'élément déterminant du problème de la mesure.

Les deux premiers axiomes présentés par von Neumann définissent l'appareil analytique, ou logico-mathématique, de la MQ, soit l'espace de Hilbert. C'est l'élément fondateur sur lequel repose le formalisme de la MQ. Le premier axiome soutient qu'il existe un espace de Hilbert, dont les vecteurs, soit les *vecteurs d'états* ou *vecteurs propres*, définissent l'état, ou la *fonction d'onde*, d'un système physique. Le deuxième postulat soutient, pour sa part, qu'il y a bijection entre les observables et les opérateurs auto-adjoints de l'espace de Hilbert. Quant au troisième postulat, il a trait à l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde, telle que définie par Max Born. Par exemple, la probabilité qu'une particule se situe à un endroit précis est déterminée en fonction de la norme (ou du carré de la valeur absolue) de la fonction d'onde. En fait, pour être plus précis, la probabilité que la particule soit à un endroit est établie selon la densité de probabilité. Enfin, les quatrième et cinquième postulats de la théorie de von Neumann représentent les éléments sur lesquels porte tout le débat du problème de la mesure. On présente, dans le quatrième postulat, la célèbre équation de Schrödinger, qui correspond à l'aspect dynamique de la MQ, c'est-à-dire le développement, dans le temps, de la fonction d'onde selon l'hamiltonien du système. Quant au cinquième et dernier postulat, le postulat de projection, qui est en fait le nœud du problème, est de nature statique, contrairement au postulat précédent. Ainsi, le système physique, initialement en état de superposition, dont l'évolution est conforme à l'équation de Schrödinger, est subitement « projeté », en vertu de l'acte de mesure, vers le vecteur d'état dont la valeur propre correspond au résultat de mesure obtenu.

Il y a donc une inconsistance dans cette théorie. En vertu du quatrième postulat, on soutient que tout système physique, quel qu'il soit, est soumis en tout temps à l'équation de Schrödinger décrivant son évolution. Toutefois, en vertu du postulat suivant, le postulat de projection, on affirme qu'en effectuant une mesure, le système cesse subitement de se développer et se réduit à l'un de ses états propres. Comment un processus ou un mécanisme, l'acte de mesure dans ce cas-ci, peut-il soustraire un système physique, qu'il s'agisse ou non d'un système combiné (observateur/observé), de la loi la plus fondamentale de la MQ, l'équation de Schrödinger, qui est de nature essentiellement dynamique? C'est la question sur laquelle repose tout le débat et l'interprétation, que nous présentons dans la section suivante, tente d'y apporter une réponse.

2.2.2. Everett, De Witt, Graham & Wheeler : interprétation des multivers

Avant d'aborder la théorie elle-même, décrivons brièvement le contexte historique, qui nous permettra ainsi de mieux comprendre l'émergence de ce courant de pensée qui, comme nous le verrons, ne tombe certainement pas sous le sens commun. Nous sommes dans les années 50 et l'intérêt en physique, à cette époque, porte en particulier sur la formulation d'une théorie quantique de la relativité générale. Cet intérêt s'explique notamment par les travaux de groupes de « relativistes » issus de Princeton ou de l'école de Chapel Hill où se trouve Bryce De Witt. On peut également citer les travaux de Feynman sur la question.

Pour ce courant particulier de recherche, l'idée de la quantification d'un système clos comme l'univers, et d'une fonction qui rend compte de son état, semble une idée très attrayante. On peut même considérer que cette idée, une sorte de *fonction d'onde universelle*, constitue l'objectif ultime de cette recherche. Toutefois, pour y arriver, il est nécessaire d'apporter un changement radical à la théorie de la mesure généralement reconnue à cette époque, c'est-à-dire celle de John von Neumann, que nous avons décrite précédemment. En particulier, les relativistes ne peuvent envisager le premier type de changement sur lequel repose en partie la théorie de von Neumann. Rappelons que ce type de changement correspond à un processus non continu et non causal, qui va à l'encontre de l'équation de Schrödinger et qui est provoqué par le système observateur ou

l'acte de mesure. En d'autres mots, on ne peut concevoir un quelconque appareil de mesure ou un observateur « ultime » qui fixe la mesure, soit un processus en vertu duquel il y a réduction (*collapse*) de la fonction d'onde. L'observateur et l'objet font partie d'un même système physique, dont l'évolution est décrite par l'équation de Schrödinger, qui exclut en conséquence un changement discontinu comme la réduction de la fonction d'onde causée par l'acte de mesure.

Étudiant d'abord en chimie et, par la suite, en physique mathématique aux études supérieures à Princeton, Hugh Everett III présente en 1956 une thèse de doctorat intitulée *Relative state formulation of quantum mechanics*. Avec la recommandation de John A. Wheeler, ses travaux feront l'objet d'une publication, l'année suivante, en 1957, dans la revue *Reviews of modern physics* (reproduit dans WZ 1983 : 315-323). Mais ce n'est qu'une dizaine d'années plus tard, surtout grâce à De Witt de Chapel Hill, que ses travaux seront véritablement connus par la communauté des physiciens.

Everett est à l'origine d'un courant d'interprétation en MQ, que l'on désigne par le nom de *théorie des multivers* (*many-universe theory* ; *many-world theory*). Everett apporte en fait le changement nécessaire, évoqué plus haut, à la théorie de la mesure formulée par von Neumann. On pourrait dire que, contrairement à l'approche « dualiste » de von Neumann, il propose une approche « moniste ». Plus précisément, Everett remet en question le changement de premier type, soit le processus non causal et non continu, que nous avons expliqué précédemment. Everett ne retient donc, de la théorie de von Neumann, que la deuxième proposition selon laquelle tout processus physique est causal et continu. Alors, la seule et unique règle, qui décrit l'interprétation de Everett, soutient que *tout processus physique, quel qu'il soit, évolue selon l'équation de Schrödinger*. Il n'y a donc pas d'acte quelconque, la mesure notamment, qui peut soustraire momentanément un système physique de la dynamique telle que décrite par Schrödinger. Tout est donc en superposition, qu'il s'agisse de l'appareil de mesure ou même de l'humain qui effectue l'observation. C'est d'ailleurs à cause de ce fait que cette interprétation est tellement contre-intuitive, c'est-à-dire contre le sens commun.

Essayons maintenant de décrire très brièvement, de façon informelle, l'intuition qui est à la base de l'interprétation d'Everett. Au lieu de se référer au nom même de l'interprétation, *théorie des*

multivers (many-universe theory ; many-world theory), dont le sens précis n'apparaîtra que plus tard, référons-nous plutôt au titre original de la thèse de doctorat d'Everett, *Relative state formulation of quantum mechanics*. C'est précisément par cette notion d'*état relatif* que l'on peut mieux saisir l'interprétation d'Everett (WZ 1983 : 317). Ce dont il est précisément question ici correspond à l'état du système observateur *relatif* à l'état du système observé. En fait, c'est le système observé, plus précisément son état et la valeur propre qui lui est associée, qui détermine l'état, et le résultat de mesure, du système observateur. Pour chaque état du système observé, il existe donc un état du système observateur, d'où la superposition à la fois de l'objet et de l'observateur.

Étant donné que l'interprétation d'Everett exclut d'emblée la réduction de la fonction d'onde mais que nous observons pourtant un résultat de mesure, De Witt apportera un nouvel élément à cette théorie, soit le *splitting world* (d'où le nom *many-world theory*), qui constituera l'élément le plus controversé et, comme nous l'avons déjà expliqué, l'élément le plus contre-intuitif de l'interprétation d'Everett. Plus précisément, lorsqu'une mesure est effectuée, au lieu que se produise une réduction (*collapse*) de la fonction d'onde comme le soutient von Neumann, il y a plutôt *ramification* de la fonction d'onde, ce qui ne remet pas en question la dynamique décrite par l'équation de Schrödinger. Chaque « branche » de la fonction d'onde correspond donc à un « monde possible », où le système observateur obtient un résultat de mesure déterminé du système observé. Nous avons donc, en principe, selon l'interprétation d'Everett révisée par De Witt, une fonction d'onde, à caractère universel, qui comporte autant de ramifications que de résultats de mesure. Ainsi, dans cette version, l'interprétation d'Everett, soit la théorie des multivers, permet d'affirmer à la fois que tout processus physique est soumis à l'équation de Schrödinger et qu'il est possible d'obtenir des résultats de mesure bien déterminés, ce que ne permettait pas de faire la théorie de mesure de John von Neumann.

Comme on peut s'en douter, cette interprétation est controversée et soulève donc plusieurs questions. Nous allons examiner quelques-unes de ces questions, qui ont trait notamment à ce mystérieux processus physique de ramification et à la consistance même de la théorie d'Everett. En ce qui concerne tout d'abord la ramification, comment peut-on rendre compte d'un tel processus physique et, plus intrigant encore, comment l'observateur en fait-il l'expérience? Avant la me-

sure, est-il en état de superposition et, après la mesure, est-il conscient qu'il est dans telle branche plutôt qu'une autre? Il est difficile d'apporter une réponse à ces questions car, en fait, selon les défenseurs de cette interprétation, on ne fait pas l'expérience de ce processus physique. Il sera plus facile de comprendre si l'on fait l'analogie suivante : on sait que la Terre tourne autour du Soleil. Mais en fait-on, pour le moins, l'expérience? Pourtant, comme dirait l'autre, elle tourne ! On pourrait donner une foule d'autres phénomènes physiques, électriques ou magnétiques par exemple, dont on ne fait pas l'expérience. Le processus physique de ramification s'inscrit donc dans le type de phénomènes dont l'humain, à son échelle, macroscopique, ne fait pas l'expérience. Le second problème concerne, comme nous l'avons mentionné, la consistance de la théorie d'Everett. Nous présentons deux points de vue, le premier soutenant la consistance de la théorie et l'autre son inconsistance, et ce, selon des critères différents. La première démonstration (WZ 1983 : 319-320; Jammer 1974 : 513-514), dont le résultat est la consistance de la théorie d'Everett, consiste à démontrer notamment qu'un observateur situé dans une branche de la ramification ne peut obtenir qu'un résultat de mesure bien déterminé et ne peut reproduire un résultat de mesure déjà obtenu par un observateur situé dans une autre branche de la ramification. En gros, la preuve est obtenue en plaçant un deuxième observateur dans la branche et, en tenant compte de l'état relatif du premier observateur, on arrive à la conclusion que le deuxième observateur parvient au même état que le premier. Donc, dans ce cas-ci, la démonstration de la consistance de la théorie d'Everett s'appuie sur le fait qu'on ne peut retrouver simultanément un même résultat de mesure dans plus d'une branche de la ramification. La deuxième démonstration, quant à elle, conclut au contraire que la théorie d'Everett n'est pas consistante. L'argument de Gauthier (1992 : 49-50, 143-145) repose essentiellement sur la notion de cardinalité d'un ensemble. À cet effet, il faut comprendre que l'ensemble des nombres naturels est dénombrable (cardinal \aleph_0) alors que l'ensemble des nombres complexes ou l'ensemble des nombres réels est non dénombrable (cardinal 2^{\aleph_0}). En conséquence, il ne peut y avoir bijection entre les valeurs de la fonction d'onde, qui correspond à \mathbb{C} (l'ensemble des nombres complexes) qui est non dénombrable, à l'ensemble des résultats de mesure, qui est un ensemble dénombrable. Il y a donc forcément inconsistance dans la théorie d'Everett. En dernier lieu, on pourrait se demander, à la lumière de l'interprétation conventionnelle de la MQ, en particulier de l'interprétation probabiliste de Max Born, comment Everett rend compte de la probabilité d'obtenir un résultat de mesure. À cet égard, Everett soutient que le formalisme engendre sa propre interprétation, d'où la possible déri-

vation, à partir du formalisme, de la probabilité d'obtenir un résultat de mesure conforme à l'interprétation probabiliste standard de la MQ (WZ 1983 : 322-323; Jammer 1974 : 515-516). En effectuant un nombre infini de mesures indépendantes sur un système physique dont l'état initial est connu, on constate que la distribution des résultats obtenus dans une suite, chaque suite correspondant à l'état de superposition de la fonction d'onde après une mesure, correspond à la probabilité telle que calculée selon l'interprétation de Born.

Bref, nous sommes en mesure de constater que la théorie d'Everett, quoique défendable sur certains points, soulève d'importants problèmes sur d'autres points. Dans la section suivante de notre mémoire, nous allons décrire une autre interprétation de la MQ qui, tout en s'inscrivant dans le même courant de pensée que la théorie d'Everett, vise cependant à apporter une solution à certains problèmes que nous avons soulevés.

2.2.3. Albert : interprétation des multiconsciences

C'est dans un article de la revue *Synthese*, intitulé *Interpreting the Many-Worlds interpretation*, publié en 1988, que David Albert, en collaboration avec Barry Loewer, aborde la théorie des multivers, tel que formulée par Everett, De Witt, Graham et Wheeler. Notre compte rendu de l'interprétation d'Albert, l'interprétation des multiconsciences (*Many-Minds View*), sera bref car, comme l'indique le titre de l'article dans lequel elle a été présentée, cette interprétation s'appuie largement sur la théorie des multivers décrite précédemment. Mais, comme nous le verrons, la réflexion d'Albert remet en question des éléments fondamentaux de la théorie d'Everett.

Mentionnons, pour commencer, que les deux interprétations, celle d'Albert comme celle d'Everett, partagent le même postulat fondamental selon lequel *l'état de tout système ou processus physique évolue selon l'équation de Schrödinger* (Albert & Loewer 1988 : 203). Qu'il s'agisse d'un objet ou d'un appareil de mesure, leur dynamique est décrite selon cette équation fondamentale. De façon informelle, l'équation de Schrödinger indique simplement que la fonction d'onde d'un système physique se développe selon son hamiltonien. Rappelons aussi que l'équation de Schrödinger est l'un des cinq postulats de base de la théorie de la mesure de John

von Neumann. Mais c'est précisément là où s'arrête la comparaison, car l'interprétation d'Albert n'endosse d'aucune façon le postulat de projection de la théorie de von Neumann. Elle n'endosse pas plus, d'ailleurs, le phénomène de ramification qui est à la base de la théorie des multivers d'Everett (Albert & Loewer 1988 : 200). Il s'agit là de la différence majeure entre l'interprétation proposée par Albert et celle d'Everett. Pour Albert, il n'existe aucun mécanisme, que ce soit la projection ou la ramification, qui puisse soustraire un système physique de la dynamique décrite par l'équation de Schrödinger. Il n'existe qu'une seule fonction d'onde, qu'il y ait acte de mesure ou non. David Albert ne peut concevoir que, lorsqu'on effectue une mesure, la fonction d'onde est soudainement projetée vers l'un de ses états propres ou, selon Everett, qu'elle subit un processus de ramification à l'infini. Et, concernant précisément ce processus de ramification, il est difficile de concevoir, selon l'équation de Schrödinger, notamment selon l'exigence de la conservation de l'énergie, qu'il y ait reproduction, en fonction de chaque résultat de mesure, du système observateur et du système observé dans la multitude de branches qui composent la ramification de la fonction d'onde (Albert & Loewer 1988 : 201). Bien que l'observateur ait conscience d'une seule mesure et qu'ainsi une seule des branches corresponde au « monde réel », il doit y avoir conservation de l'énergie dans le système physique, et ce processus de ramification, par lequel il y a multiplication du système observateur et du système observé, semble violer ce principe. Enfin, Albert soulève un autre problème important de la théorie d'Everett, qui a trait aux probabilités (Albert & Loewer 1988 : 201). Bien que ce dernier puisse dériver du formalisme les probabilités telles que prévues selon la théorie standard de la MQ, comment les interprète-t-il, au juste, par rapport à sa théorie, notamment par rapport à la fonction d'onde ramifiée? Parmi tous les « mondes possibles », se demande Albert, y en a-t-il un plus « réel » ou « actuel » que les autres? Tout cela laisse perplexe.

Nous avons évoqué ci-haut, très brièvement, quelques problèmes que soulève, selon David Albert, la théorie formulée par Everett. Décrivons maintenant l'interprétation des multiconsciences, l'interprétation formulée par Albert, qui vise à résoudre notamment ces problèmes. Le principal enjeu de David Albert est de taille. Il vise à faire abstraction de tout mécanisme, comme ceux de la projection ou de la ramification, pour que demeure valide le seul postulat fondamental de ce courant de pensée, soit l'équation de Schrödinger, et ce, en garantissant à l'observateur des résultats de mesure déterminés et en le préservant également de l'effet de superposition (Albert &

Loewer 1988 : 203). Si Everett parvient à ce résultat grâce à la ramification de la fonction d'onde, où l'observateur obtient, dans chaque branche de la ramification, un résultat bien défini, Albert, pour sa part, y parvient en se référant à la conscience de l'observateur (Albert & Loewer 1988 : 203-204). Donc, contrairement à Everett qui a recours à un mécanisme physique dans sa théorie, Albert se réfère tout simplement à la conscience de l'observateur. Il faut bien comprendre que l'observateur, y compris son cerveau, en tant que système physique, est sujet au phénomène de superposition. Toutefois, la conscience de l'observateur, conscience qui est, précise Albert, associée au cerveau de l'observateur, est un élément non physique et n'est donc pas sujet à la superposition. La conscience agit donc comme l'observateur « ultime ». Il s'agit là de l'élément déterminant de l'interprétation d'Albert. Si l'aspect physique de l'observateur est en superposition, dont chaque état correspond à un résultat de mesure, la conscience, quant à elle, associée à chaque état de l'observateur, obtient un résultat de mesure bien défini sans subir l'effet de superposition. C'est en ce sens que la conscience est en quelque sorte l'observateur « ultime ». Ce qui est donc essentiel de comprendre est le fait que l'interprétation d'Albert n'a recours à aucun mécanisme physique pour justifier les résultats de mesures obtenus par l'observateur. La seule règle en vigueur dans l'interprétation d'Albert est l'équation de Schrödinger, véritable postulat de base de ce courant de pensée. Abordons finalement la notion de probabilité (Albert & Loewer 1988 : 206-207). C'est là où l'interprétation de Albert est la plus originale par rapport aux autres interprétations s'inscrivant dans ce courant de pensée. À chaque état de l'observateur est associée non pas une mais bien plusieurs consciences. Et ces consciences, qui sont associées au même état de l'observateur et qui obtiennent donc le même résultat de mesure, sont en nombre proportionnel à la probabilité d'obtenir ce résultat. Autrement dit, la probabilité d'obtenir un résultat de mesure correspond à la proportion que représente le nombre de consciences associées à cet état particulier de l'observateur. Et cette probabilité est conforme à celle de la théorie standard de la MQ, c'est-à-dire conforme à l'interprétation probabiliste de Max Born.

Somme toute, comme nous sommes en mesure de le constater, l'interprétation proposée par David Albert est originale mais, de façon générale, nous laisse un peu perplexe. Signalons tout d'abord, à notre avis, son principal mérite. David Albert a su formuler une interprétation de la MQ qui a comme règle exclusive le dogme de ce courant de pensée, soit l'équation fondamentale de Schrödinger. Comme nous l'avons expliqué, Albert n'a recours à aucun mécanisme, qu'il

s'agisse de la projection ou de la ramification, qui suspend momentanément, lors de la mesure notamment, la dynamique du système physique décrite par l'équation de Schrödinger. Toutefois, et c'est là le principal défaut de l'interprétation proposée par Albert, il n'a pas su nous convaincre qu'il a en fait réglé le problème de la mesure. De quelle façon au juste l'observateur obtient-il ce résultat? En d'autres termes, parmi l'ensemble des consciences liées aux états de l'observateur, de quelle façon, après la mesure, une conscience, associée à un résultat de mesure précis, est-elle « effective » plutôt qu'une autre? Albert se réfère à une certaine « association » (Albert & Loewer 1988 : 208) entre l'observateur et une conscience déterminée, sans toutefois apporter des détails sur cette forme d'« association ». D'une certaine façon, nous revenons au point départ qui est d'établir un moyen par lequel l'observateur obtient un résultat de mesure. À cet égard, l'interprétation de David Albert nous laisse sur notre faim. Enfin, comme c'est le cas pour la théorie proposée par Everett, la théorie des probabilités associée à l'interprétation de David Albert pose un problème. Compte tenu de l'ensemble non dénombrable des valeurs que peut prendre la fonction d'onde, comment peut-on associer, à ces valeurs, une probabilité définie? Peut-on vraiment parler de la somme des probabilités associées aux éléments d'un ensemble non dénombrable? Ici, on remet donc en question la propriété σ -additive de la théorie des probabilités, c'est-à-dire le fait qu'elle soit dénombrable.

Conclusion

Dans ce mémoire de maîtrise, nous avons traité essentiellement des aspects historiques et philosophiques de l'une des théories les plus importantes en physique, soit la mécanique quantique. Nous avons alors fait référence à diverses réflexions portant sur le formalisme et, surtout, sur l'interprétation de cette théorie physique. Il est temps maintenant de conclure cette étude en relevant les points les plus importants.

Tout d'abord, dans l'étude historique de la MQ effectuée dans le premier chapitre de notre mémoire, nous avons mis l'accent sur la rupture radicale qui s'est produite entre deux modes de pensée scientifique. Le passage de l'approche classique en physique à l'approche quantique constitue un exemple éloquent de ce type de bouleversement dans l'histoire des sciences. Dans la physique classique, c'est-à-dire celle développée selon la mécanique de Newton, nous travaillons avec des concepts familiers, comme la position, la vitesse ou la quantité de mouvement, qui sont facilement saisis par l'intuition naturelle ou le sens commun. Par contre, selon la nouvelle approche, ces concepts familiers sont désormais représentés, en physique quantique, par des opérateurs, des fonctions d'onde, etc... Et de plus, est associée à ces nouveaux concepts l'interprétation probabiliste, formulée par Max Born, qui remet en cause, de façon radicale, la vision déterministe que procure la mécanique classique. Nous sommes en mesure de voir qu'il y a effectivement un changement radical de pensée dans ce domaine.

Nous avons traité finalement, dans le deuxième chapitre de ce mémoire, des interprétations attribuées à la MQ au cours de son histoire. Nous avons d'abord considéré les interprétations les plus fondamentales, soit celle formulée par Bohr et Heisenberg et celle présentée principalement par Einstein. L'interprétation dite de Copenhague a eu d'abord comme résultat les relations d'indétermination, formulées par Heisenberg, selon lesquelles une connaissance simultanée et précise de certains paramètres physiques, plus précisément de variables canoniques conjuguées, n'est pas possible. Et cette interprétation a eu comme deuxième résultat le principe formulé par Bohr, le principe de complémentarité, en vertu duquel des descriptions spatio-temporelle et causale de tout système physique est simultanément impossible, remettant ainsi en question le lien de causalité établi entre les phénomènes par un observateur. La deuxième interprétation, que nous

considérons également comme fondamentale, est soutenue principalement par Einstein et s'oppose à l'interprétation de Copenhague en tentant de démontrer son inconsistance et son incomplétude. En particulier, dans la démonstration de l'incomplétude de la MQ, Einstein tire un paradoxe logique en vertu d'un critère, de nature épistémologique, qui porte sur la connaissance de la réalité. Bohr réfute finalement le critère proposé par Einstein en se référant à un aspect essentiel du processus de mesure à l'échelle microscopique, soit l'inévitable interaction ou relation entre le système observateur et le système observé. Enfin, nous avons décrit l'interprétation formulée par David Albert, l'interprétation des multiconsciences, qui s'inscrit dans le courant de pensée inauguré par la théorie d'Everett, la théorie des multivers. Nous avons d'abord souligné les avantages de cette interprétation. Premièrement, elle adopte comme unique postulat la règle fondamentale de tout ce courant de pensée, soit l'équation de Schrödinger qui décrit l'évolution dynamique d'un système quantique. Deuxièmement, contrairement à la théorie d'Everett, elle évite l'état de superposition du système observé et du système observateur. Pour ce faire, l'interprétation d'Albert a recours à la conscience de l'observateur, c'est-à-dire un élément non physique, qui ne subit donc pas l'effet de superposition. Troisièmement, l'interprétation proposée par Albert ne comporte aucun mécanisme, qu'il s'agisse du postulat de projection de von Neumann ou du processus de ramification de la fonction d'onde tel que décrit par Everett, qui va à l'encontre de l'équation fondamentale de la MQ. En ce qui concerne maintenant les problèmes importants soulevés par l'interprétation d'Albert, nous avons d'abord noté, comme pour la théorie des multivers, que les valeurs prises par la fonction d'onde correspondent à un ensemble non dénombrable. Pourtant, l'ensemble des résultats de mesure est dénombrable. Cela soulève également un problème à propos de la théorie des probabilités qui, en principe, dans ce cas-ci, devrait être σ -additive ou, en d'autres mots, dénombrable. En dernier lieu, nous nous interrogeons sur le processus en vertu duquel, lors de l'acte de mesure, une conscience devient « effective » et grâce auquel l'observateur obtient ainsi un résultat de mesure déterminé. Albert se réfère à une certaine « association » entre l'observateur et ladite conscience. Nous aurions aimé que David Albert apporte plus de précisions quant à la nature de ce processus d'« association » entre l'observateur et une conscience déterminée en fonction de laquelle il y a obtention d'un résultat de mesure. En somme, lorsqu'on compare ces problèmes, certes non négligeables et même importants, aux avantages décrits ci-haut, l'interprétation des multiconsciences proposée par David Albert exerce, à notre avis, peu d'attrait.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERT David (1983). «On the theory of quantum mechanical automata», *Physics Letters*, 98A:249-252
- (1988). «On the possibility that the present quantum state of the universe is the vacuum», *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 2, pp. 127-133
- (1991). «The measurement problem: some solutions», *Synthese*, 86:87-98
- (1992). *Quantum mechanics and experience*, Mass.: HUP
- ALBERT David & Barry LOEWER (1988). «Interpreting the many worlds interpretation», *Synthese*, 77:195-213
- ALBERT David & L. VIADMAN (1988). «On a proposed postulate of state-reduction», *Physics Letters*, 139A:1-4.
- BELL, J. (1964). «On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox», *Physics*, 1:195-200
- BITBOL, Michel (1998). *L'aveuglante proximité du réel*, Paris:Flammarion
- BOHM, David (1952). «A suggested interpretation of quantum theory in terms of hidden variables», *Physical Review*, 85:166-193.
- DE WITT, Bryce (1970). «Quantum mechanics and reality», *Physics Today*, 23:30-35
- DIRAC, Paul A. M. (1958). *The principles of Quantum Mechanics*, Oxford, Oxford University Press
- EINSTEIN, Albert, B. PODOLSKY & N. ROSEN (1935). «Can the quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review*, 47:777-780
- D'ESPAGNAT, Bernard (1965). *Conceptions de la physique contemporaine*, Paris:Hermann
- (1998). *Physique et réalité*, Paris : Diderot
- DEWITT B. & GRAHAM N. (1973) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics* Princeton : PUP
- EVERETT, Hugh (1957). «Relative state formulation of quantum mechanics», *Review of Modern Physics*, 29:454-462
- GAUTHIER, Yvon (1982). *Théorétiques. Pour une philosophie constructiviste des sciences*, Longueuil : Le Préambule
- (1992). *La logique interne des théories physiques*, Montréal/Paris : Bellarmin/Vrin
- (1995). *La philosophie des sciences. Une introduction critique*, Montréal : PUM
- JAMMER Max (1974). *The philosophy of quantum mechanics. The interpretations of quantum mechanics in historical perspective*, New York : John Wiley & sons
- (1989). *The conceptual development of quantum physics*, 2^e éd., New York : American institute of physics
- JAUCH, Josef M. (1968). *Foundations of Quantum Mechanics*, Massachusetts : Addison-Wesley.
- NEUMANN, J. von (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton : PUP
- OMNÈS, Roland (1994a). *The interpretation of quantum mechanics*, Princeton : PUP
- (1994b). *Quantum Philosophy*, Princeton : PUP
- (1999). *Understanding quantum mechanics*, Princeton : PUP

VAN FRAASSEN, Bastiaan C. (1991). *Quantum mechanics. An empiricist view*, New York/Oxford : Clarendon Press/OUP

WHEELER, John A. & Wojciech H. ZUREK (ed.) (1983). *Quantum mechanics and measurement*, Princeton : PUP [Cet ouvrage est un excellent ouvrage de référence. Il contient plusieurs articles originaux qui ont marqué la théorie de la mesure. Plusieurs articles cités dans cette bibliographie sont reproduits dans cet ouvrage]