

Aix-Marseille Université
UFR d'Arts, Lettres, Littérature et Sciences Humaines
Département de philosophie
Master de philosophie et histoire des sciences fondamentales :
mathématiques et physique
Alice van Helden

Mémoire de M1 : philosophie de la physique

L'indéterminisme en mécanique quantique : implications,
querelles et alternatives

Sous la direction de MM. Thierry Masson et Igor Ly

Mai 2016

Aix-Marseille Université
UFR d'Arts, Lettres, Littérature et Sciences Humaines
Département de philosophie
Master de philosophie et histoire des sciences fondamentales :
mathématiques et physique
Alice van Helden

Mémoire de M1 : philosophie de la physique

L'indéterminisme en mécanique quantique : implications,
querelles et alternatives

Sous la direction de MM. Thierry Masson et Igor Ly

Mai 2016

Abréviations

DET : Pomian, Krzysztof, dir. *La Querelle du déterminisme. Philosophie de la science d'aujourd'hui*, Paris, Gallimard, 1990 (Le Débat. Histoire-Politique-Société).

MB : Bitbol, Michel. *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*, Flammarion, 1996.

FL : Laloë, Franck. *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, EDP Sciences, 2011.

FS : Selleri, Franco. *Le grand débat de la théorie quantique*, Paris, Flammarion, 1986.

MQ : Deligeorges, Stéphane, dir. *Le Monde quantique*, Le Seuil, collection Point-Science n°46, 1984.

Introduction

Selon le philosophe Cornélius Castoriadis, la science est véritablement en crise, et il est nécessaire de reprendre l'interrogation théorique du savoir scientifique, c'est-à-dire celle sur sa nature (qui est différente de celle du savoir philosophique), sur sa valeur (en tant que représentation de la réalité), sur son orientation (son but, ce à quoi il doit être utilisé), sur son mode de production (la méthode scientifique) et sur ses produits (et notamment les catastrophes entraînées par le nucléaire ou par l'accélération de la production industrielle). Alors même que ces questions ne font pas l'objet de remise en cause par le reste de la population qui, bien qu'elle ressente un profond désarroi (dans une société divisée, inégale et cloisonnée dans la répartition du savoir, désillusionnée, sans but, destructrice pour les humains et la nature), s'estime au moins certaine de son savoir. Personne ne conteste la scientificité de la science, comme si elle était une évidence.

De façon plus spécifique, ce qui a succombé selon lui aux dernières avancées en physique, c'est l'indépendance du savoir par rapport au sujet, son objectivité toute galiléenne. Ces avancées forcent l'homme de science à l'interrogation philosophique, en mettant en cause à la fois la métaphysique sous-jacente à sa science (l'interprétation du type d'être qu'elle décrit quand elle parle d'objets physiques, mathématiques ou autres), sa logique (qui lie ces objets donc ne peut supporter de contradiction entre eux), son modèle de savoir (qui a subi une perte de rationalisme par rapport à ce qu'était le savoir de la physique classique), la limite qu'il pose entre la science et la philosophie (puisque les questions ontologiques de la physique rejoignent la philosophie), et sa fonction dans la société (en quoi s'y implique la science). Et cette mise en question de la science entraîne forcément une mise en question de la philosophie puisqu'elle efface la limite qui la sépare de la science : on ne peut plus défendre un positivisme qui croirait pouvoir les distinguer, ni une philosophie qui ne penserait que dans son propre langage, sans évoquer celui de la science.

Précisons les difficultés qui se posent à propos des phénomènes physiques : ce n'est pas seulement la possibilité de représentation intuitive des processus qui s'écroule, ce sont aussi les catégories de la pensée physique, au sens ici des définitions selon lesquelles on structure les objets de la physique, du fait de deux éléments de l'interprétation actuelle qui se rejoignent : la réfutation de l'idée que les systèmes ont des propriétés physiques bien définies en l'absence d'observation de ces propriétés et l'introduction de l'inséparabilité selon laquelle on ne peut concevoir de sous-systèmes ou de systèmes partiels sans prendre en compte la totalité. Le premier élément remet également en cause

l'opposition sujet/objet, par le fait que le sujet, à travers le processus de mesure, intervient dans la détermination de l'objet ; qu'on ne peut décrire ce dernier sans prendre en compte le premier.

En effet, l'interprétation actuelle de la mécanique quantique considère certaines propriétés des objets quantiques comme indéterminées, intermédiaires entre toutes leurs possibilités jusqu'à ce que l'une de celles-ci soit pointée aléatoirement par une mesure. Cette vision des choses paraît étonnante à un esprit rationnel, elle entraîne inévitablement la question de savoir si les physiciens se sont tant enfermés dans leur monde théorique aux possibilités infinies qu'ils se sont détachés des contraintes terre-à-terre du monde qu'ils essayaient depuis toujours de caractériser. Mais essayent-ils toujours de caractériser ce monde ou considèrent-ils déjà que cette intention est illusoire ? J'évoquerai cette question dans un second temps, car tout d'abord, il est nécessaire de revenir sur un panorama des apparences dont s'habille le hasard en physique classique, le « petit frère » de l'indétermination qui nous occupe, et sur la spécificité de cette dernière par rapport à ce hasard auquel nous nous étions habitués avant l'intervention des dernières avancées en physique. On pourra y voir qu'il s'agit là d'un véritable changement conceptuel, cause partielle (ou reflet ?) du changement de paradigme décrit par Castoriadis.

Par la suite, je me pencherai sur ledit changement conceptuel et sur les possibilités d'adapter, plutôt que d'abandonner, les concepts questionnés sous une forme suffisamment proche de celle que nous leur connaissions. Enfin, on pourra trouver l'objet essentiel de ce travail : l'exposition des raisons physiques qui ont amené le changement de paradigme et l'étude des possibilités d'adopter une autre interprétation qui prenne en compte ces raisons. La question principale qu'il s'agit de traiter est la suivante : est-il réellement nécessaire d'abandonner tout ce qu'il nous faudra abandonner et de transformer tout ce qu'il nous faudra transformer dans notre vision du monde et de la science afin de s'adapter aux bouleversements de la physique du XX^{ème} siècle, ou peut-on trouver une solution qui autorise à conserver ce qu'il nous coûte d'abandonner, c'est-à-dire l'idée que les objets du monde ont des propriétés propres et qu'il est possible de se les représenter, et en particulier que les choses inertes exemptes de volonté évoluent de manière déterminée ?

Je tenterai de ne me constituer ni en tant que défenseure ni en tant que critique de l'interprétation actuelle, car maintenir un avis dès le départ entraverait le questionnement philosophique. Par ailleurs, je n'ai trouvé que peu de philosophes qui abordent la question de ce travail, sans doute parce qu'elle requiert des connaissances approfondies dans le domaine de la physique ; il est plus courant de la trouver dans les écrits de certains physiciens qui prennent de la distance par rapport à leur propre domaine afin d'avoir sur lui un regard critique. Il est donc possible que ce travail présente un aspect physique un peu disproportionné, ou se réfère souvent aux mêmes sources en

matière de philosophie.

Il est entendu que la question de l'indétermination n'est pas l'unique aspect problématique de la mécanique quantique, il y aurait beaucoup à dire sur le problème de l'accès au réel de manière générale qu'évoque Castoriadis, sur celui de l'influence instantanée à distance, sur celui de sa compatibilité avec d'autres théories comme celle de la relativité, et sans doute en ometts-je, mais le problème de l'indétermination est le plus délicat. Il est le principal responsable du clivage des physiciens à propos de l'interprétation de la mécanique quantique, et ce, depuis les débuts de l'existence du domaine. C'est pourquoi je vais tenter de m'y consacrer en laissant de côté d'autres questions malgré tout l'intérêt philosophique et scientifique qu'elles puissent présenter.

A. Le hasard n'est qu'une forme latente de déterminisme

1. Utilisation des probabilités en physique classique

L'avènement de la physique statistique à partir du milieu du XIX^{ème} siècle a fait ressortir une propriété stupéfiante de la matière qu'est l'émergence d'ordre à partir de désordre et d'une prévisibilité de ce que l'on aurait appelé le hasard.

Commençons par définir ce qu'on y entend par une probabilité. Il existe une théorie axiomatique des probabilités, formalisée par Andrey Kolmogorov, qui donne les moyens de les calculer. La probabilité d'un événement e y est définie comme suit¹ : « Soit E un ensemble d' "événements élémentaires" (E est aussi appelé "événement exhaustif"). Soit e l'un de ses sous-ensembles, appelé un "événement aléatoire". La probabilité d'un événement e est alors définie (...) comme un nombre réel $P(e)$ qui obéit aux deux conditions suivantes :

(i) $P(E) = 1$

(ii) Si e et e' sont mutuellement exclusifs (...) alors $P(e \cup e') = P(e) + P(e')$. »

Ces axiomes permettent l'utilisation des probabilités, mais ne constituent pas vraiment une définition de la nature de celles-ci. C'est pourquoi le philosophe des sciences Michel Bitbol relève cinq de ces définitions :

(1) Le degré de croyance qu'entretiennent les personnes au sujet de l'occurrence d'un événement²,

(2) Le degré de croyance qu'un certain corpus de connaissances préalables conduit rationnellement à entretenir au sujet de l'occurrence d'un événement³.

Notons que la définition populaire, laplacienne, de la probabilité comme *rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas possibles* relève de cette seconde conception (...).

(3) La fréquence relative d'occurrence d'un certain type d'événements à l'intérieur d'une séquence temporelle d'événements suffisamment longue⁴,

(4) L'inverse du rapport de la population d'un ensemble de systèmes physiques identiques, à la population de l'un de ses sous-ensembles caractérisé par une certaine plage de valeurs des variables d'état⁵,

1 Kolmogorov, Andrey, 1933. Cité dans MB, p. 87-88.

2 R.P. Ramsey, 1926, B. De Finetti, 1927. Cité dans MB, p. 89.

3 J.M. Keynes, 1929. Cité dans MB, p. 89.

4 R. Von Mises, 1931, H. Reichenbach, 1934. Cité dans MB, p. 89.

5 J.W. Gibbs, 1902, R. Tolman, 1938. Cité dans MB, p. 89.

(5) La potentialité ou *propension* d'un événement à se produire dans un contexte donné et plus particulièrement à la suite d'une préparation expérimentale donnée¹.

Il semble que les définitions qui s'appliquent parmi celles-ci à la physique statistique sont la troisième et la quatrième (il existe justement un concept nommé ergodicité qui caractérise l'égalité de ces deux définitions, c'est-à-dire que la distribution de probabilités donnée par l'évolution temporelle d'un système soit égale à la distribution de tous les états possibles de ce système à un instant donné). La cinquième correspondra plus à la mécanique quantique. Ce qu'il est important d'y voir est que la probabilité permet de prendre en compte un grand nombre d'événements, qu'ils soient répartis sur une longue séquence temporelle ou qu'ils représentent des configurations possibles.

À la base, la physique statistique consistait à caractériser les gaz non plus comme des objets continus mais en prenant en compte les propriétés des molécules qui les constituaient. Le domaine s'étend aujourd'hui jusqu'à décrire certaines propriétés de la matière beaucoup plus fondamentale, en observant toujours les systèmes constitués d'un très grand nombre d'éléments, trop grand pour pouvoir caractériser chacun de ces éléments, mais assez grand pour pouvoir les prendre en compte en tant qu'ensemble statistique.

Bien que les phénomènes qui se produisent à cette échelle soient complètement désordonnés (agitation moléculaire impossible à mesurer en elle-même), on constate qu'il en émerge des caractéristiques (telles que la température et toutes les autres grandeurs thermodynamiques) et une évolution macroscopique du système qu'il est tout à fait possible de traduire en termes de lois probabilistes et d'obtenir ainsi une très grande précision, bien meilleure que celle que l'on pouvait avoir en considérant ces grandeurs uniquement sous leur aspect macroscopique. Cette possibilité de description est réellement étonnante, Poincaré imaginait à ce propos la situation d'un physicien à qui l'on demanderait de décrire un tel système, et qui pourrait répondre :

Vous me demandez de vous prédire les phénomènes qui vont se produire. Si, par malheur, je connaissais les lois de ces phénomènes, je ne pourrais y arriver que par des calculs inextricables et je devrais renoncer à vous répondre ; mais, comme j'ai la chance de les ignorer, je vais vous répondre tout de suite. Et, ce qu'il y a de plus extraordinaire, c'est que ma réponse sera juste.²

On pourrait dire que le calcul des probabilités permet en quelque sorte de « vaincre le hasard », d'apporter une prédiction à l'imprédictible.

1 K. Popper, 1990. Cité dans MB, p. 89.

2 Poincaré, Henri, *Science et méthode, Livre premier*, § 4, I.

2. Les chaos déterministes

Le hasard se manifeste aussi d'une autre façon en physique, dans les phénomènes dits « chaotiques ». Pour en donner une définition, reprenons la présentation très claire du mathématicien D. Ruelle¹ :

On observe fréquemment dans les systèmes classiques le phénomène de dépendance sensitive des conditions initiales. Cela signifie que si l'on fait une petite perturbation Δ_0 de l'état initial du système, la perturbation Δ_t de l'état au temps t grandit rapidement avec t . Plus précisément, on dit que l'on a dépendance sensitive des conditions initiales si Δ_t a un taux de croissance positif. C'est ce qui se passe au voisinage des *attracteurs étranges*, fort étudiés récemment.

Tout d'abord, précisons le comportement du taux d'accroissement de Δ_t . Sa condition pour définir un comportement chaotique est d'être positif (constant), mais dans la plupart des phénomènes de chaos il est même lui-même en accroissement et fait donc évoluer la perturbation Δ_t de manière exponentielle, du moins à certaines étapes de sa croissance. « À vrai dire », précise D. Ruelle, « la perturbation Δ_t ne croît exponentiellement qu'en moyenne et tant qu'elle est petite, mais nous pouvons de toute manière conclure qu'*un changement infime de la condition initiale conduit à un changement important de l'état final au bout d'un temps relativement court* ». Castoriadis parle de variation continue des conditions initiales qui conduit à une variation discontinue du résultat.

Et ce changement est tellement important qu'il ne permet ni de prévoir l'évolution du phénomène ni de remonter avec précision à la variation initiale. C'est en cela que réside le hasard.

On pourrait avoir l'impression que les phénomènes chaotiques sont des exceptions dans le champ de la physique, des cas rares comme ceux des équilibres instables (lorsque l'on place une petite bille en équilibre au sommet d'une colline par exemple, qu'une infime perturbation suffirait à faire dévaler la pente). Cependant, D. Ruelle précise bien que pour de nombreux systèmes, on a une dépendance sensitive de la condition initiale pour toute condition initiale : ce n'est pas la particularité de cette condition qui fait l'évolution chaotique, c'est la nature même des phénomènes physiques.

Comme le fait remarquer Castoriadis², certains utilisent l'évocation des chaos pour s'attaquer au déterminisme, ce qui est une erreur puisque toute la chaîne de croissance de la perturbation est causale et déterministe, et d'autres pour montrer que des processus peuvent être déterministes ET imprévisibles. En effet, contrairement au hasard statistique dont les lois sont bien connues et permettent une bonne prédictibilité, décrire le hasard chaotique par une structure mathématique est

1 DET p. 157-158.

2 Castoriadis, Cornelius, *Figures du pensable (Les Carrefours du labyrinthe)*, Paris, Seuil, 1999, p. 336.

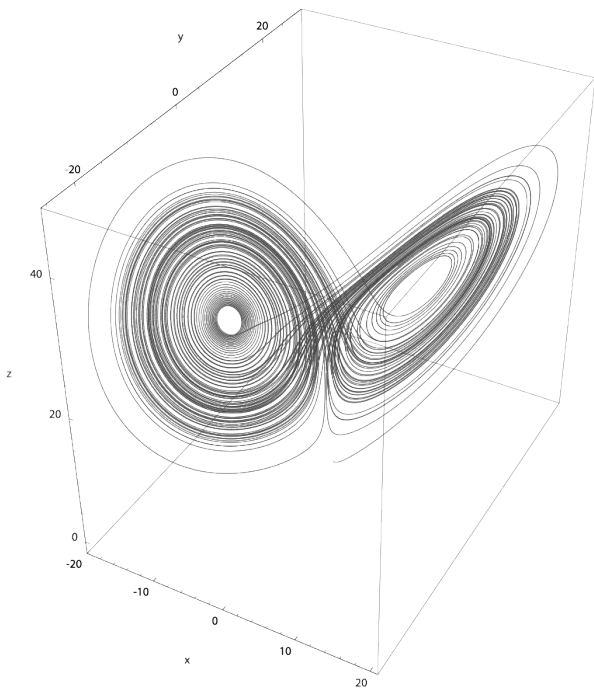
très difficile voire impossible, car les variations initiales jusqu'auxquelles il faudrait remonter se situent en dehors des capacités techniques dont nous pourrions jamais disposer expérimentalement. Néanmoins, de nombreux physiciens et mathématiciens se sont penchés sur la question, et il existe actuellement non pas une mais *des* théories du chaos, dont j'évoquerai simplement quelques aspects communs.

Les phénomènes chaotiques sont bien connus sous le nom de l'effet papillon (le battement d'ailes d'un papillon pourrait engendrer un ouragan à l'autre bout du monde), du fait d'une métaphore introduite par E. Lorenz, qui s'est intéressé aux phénomènes de chaos en météorologie et les a popularisés¹. Lorenz est le premier à avoir remarqué une propriété qui puisse rendre une certaine prédictibilité aux chaos : « J'avance l'idée qu'au fil des années les petites perturbations ne modifient pas la fréquence d'apparition des événements tels que les ouragans : la seule chose qu'ils peuvent faire, c'est de modifier l'ordre dans lequel ces événements se produisent. »

Cette propriété a été aujourd'hui confirmée pour l'ensemble des phénomènes chaotiques (qui est, rappelons-le, très large). Si on change très peu la condition initiale sur une variable dont l'évolution est chaotique, la liste des valeurs de la variable étudiée sera très différente, mais sur de très longues périodes, la fréquence d'apparition des conditions extrêmes ne changera pas. Pour revenir à l'exemple de la météorologie, on pourra par exemple prévoir qu'il y aura, sur un mois, cinq jours de pluie, sans pouvoir toutefois déterminer plus de quelques jours à l'avance comment ils seront distribués sur le mois, du fait de la rapidité de variation des perturbations atmosphériques.

De par cette propriété, on peut définir des objets mathématiques appelés « attracteurs de Lorenz », qui représentent la réponse du système chaotique à la variation de conditions initiales. Ceux-ci forment des figures quasi-périodiques aux formes très esthétiques, dont voici un exemple :

1 Une très belle illustration de la dépendance aux conditions initiales est donnée par le moulin à eau de Lorenz, dont on peut trouver des représentations sur le site du CNRS Images de Mathématiques (voir bibliographie).



(source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Attracteur_de_Lorenz#/media/File:Lorenz_attractor_boxed.svg)

Oserait-on dire que le hasard est « beau » ? Il est indéniable qu'il suscite une certaine fascination. On voit bien là ce qui mérite d'être qualifié d' « attracteur », à cette tendance que l'on peut deviner pour l'évolution du système à s'approcher d'un certain dessin périodique.

Cependant, il est certain que ces théories du chaos ne peuvent pas s'appliquer à tous les phénomènes de type chaotique, d'autant plus si on y inclut comme le font Castoriadis ou Maxwell (avec sa célèbre citation « (...), la petite étincelle qui embrase l'immense forêt, le petit mot qui met le monde en guerre, le petit scrupule qui empêche l'homme de faire ce qu'il veut, (...) »¹) les conséquences historiques d'actions humaines par exemple, ou l'accident de voiture qui ne se serait pas produit si l'on était parti une seconde plus tôt ou plus tard, car certains phénomènes descriptibles qualitativement comme dépendants des conditions initiales ne sont tout simplement pas quantifiables. Ce qui nous amène à faire une digression sur ce type de hasard particulier.

3. Parenthèse sur le hasard au sens de l'apparence d'intentionnalité

Il existe d'autres définitions du hasard, qui ne sont plus cette fois liées au fait de ne pas pouvoir faire de prédiction. Aristote par exemple introduit² d'une part ce qu'il appelle *automaton*, qui peut se traduire par « mouvement spontané » et qu'il définit comme un mouvement qui aurait pu être l'effet

¹ Maxwell, James C., 1873. Cité dans DET, p. 69.

² Aristote, *Physique*, II, 6, 197b19-22

d'une visée intentionnelle mais ne l'a pas été. (C'est-à-dire que l'intentionnalité apparente n'est pas le fait de sa propre cause finale mais d'une cause extérieure).

Par exemple, si une série de petits cailloux se détachent d'une falaise, ces cailloux n'ont pas pour cause finale de tomber selon un arrangement précis, ils tomberont simplement là où les lois physiques les feront tomber. Cependant, il se peut qu'en tombant, ils dessinent un cercle parfait, et c'est là qu'on observe cet *automaton* qui arrive sans que les choses ne soient advenues *en vue de* cela. Et parmi ces mouvements spontanés, Aristote ajoute que ceux qui peuvent être choisis par les êtres possédant la capacité de choisir (donc ceux dont l'apparition est due à la décision des humains) sont ceux que l'on peut attribuer au hasard (*tuchê*). Par exemple, si en sortant de chez soi on croise son voisin qu'on voulait précisément voir pour traiter une affaire, c'est dû à la *tuchê*.

Ces deux types d'événements sont ceux qui produisent une impression de « pouvoir » du hasard, du fait qu'ils soient rapportés à l'être humain : il faut qu'un être humain constate la forme du jet de pierre ou l'adéquation entre la pensée du voisin et la rencontre du voisin pour qu'il puisse dire que c'est un hasard incroyable. Si on sort un événement dû à l'*automaton* de son contexte psychologique, on peut parfaitement décrire le processus qui y mène en terme de chaîne causale et rien ne le différencie de l'ensemble des autres processus. On ne peut pas tout à fait en dire autant des événements causés par la *tuchê*, dans la mesure où les actions humaines ne suivent pas des enchaînements causaux strictement déterminés.

4. Le grain de sel du vivant

Puisque nous venons de voir deux formes de hasard en physique, il semble intéressant de continuer la digression sur le hasard que l'on trouve dans un autre domaine scientifique que celui de l'étude des corps inertes. En effet, si l'on observe le déplacement d'êtres vivants au fonctionnement très basique, comme des bactéries, on constate qu'il présente une apparence d'aléatoire. Certes, on pourrait dire qu'une bactérie est influencée par le mouvement du milieu dans lequel elle se trouve (par exemple les courants dans l'eau), mais ce n'est pas suffisant, car elle fournit une réponse à ce mouvement et c'est cette réponse qui ne peut être prédite (du moins avec les moyens dont nous disposons aujourd'hui). Il existe des modèles de ces mouvements en fonction des paramètres environnementaux (présence de nourriture, force du courant, composition chimique du milieu, etc.) mais le nombre de paramètres est tellement grand qu'il n'est pas possible d'obtenir des prévisions parfaites.

À plus grande échelle, on observe par exemple que le déplacement des drosophiles peut être représenté par un modèle d'aléatoire appelé « vol de Lévy »¹ qui consiste en une marche aléatoire où à chaque pas sont renouvelés l'angle et la longueur du pas suivant, à la façon des mouvements browniens. Ce type de mouvements permet une recherche plus efficace de nourriture et surtout de diminuer les chances d'être gobé par un prédateur qui surgirait subitement. Le vol de Lévy peut également se retrouver dans les stratégies de colonisation des territoires par des espèces introduites.²

À plus grande échelle encore, on retrouve le hasard dans l'évolution des espèces. Précisons que l'on entend ici le hasard au sens de la causalité (et de la prédictibilité) et non au sens de l'apparence d'intentionnalité, car on retrouve ce dernier aussi dans le lien entre la variation et la sélection, qui donne l'impression d'une finalité sans en comporter réellement³. Au sens de la causalité, donc, on peut observer le hasard à deux niveaux : au niveau moléculaire, il préside bien sûr au phénomène de variation par mutations, mais au niveau macroscopique, on le retrouve également dans le processus de sélection, pour lequel il y a trop de paramètres qui entrent en jeu pour pouvoir prévoir si un caractère sera sélectionné ou non ; en effet, le moindre saut d'un prédateur peut l'amener à franchir un buisson, tomber sur une proie qui porte le caractère et constituer ainsi l'élément déterminant qui contre-sélectionnera ce caractère, or il n'est pas possible de déterminer à l'avance avec nos moyens si le prédateur fera le saut ou pas.

Jusqu'ici, on pourrait dire que le hasard qui a été évoqué est de même nature que ceux du chaos et de la physique statistique combinés : il existe un très grand nombre de causes et les agissements d'un seul individu peut avoir des répercussions sur toute une espèce ou sur tout un milieu. Cependant, il n'est pas exclu de considérer que le hasard revêt ici une autre particularité. Revenons au saut du prédateur qui lui fera franchir le buisson : pourquoi n'est-il pas possible de le prévoir ? On pourrait dire que c'est parce que nous n'avons pas accès à l'ensemble des processus chimiques qui se produisent dans ses muscles ou qui se sont produits dans son cerveau pour amener celui-ci à la configuration qui engendrera le saut. Mais il est également possible de défendre que le prédateur a fait un choix. C'est-à-dire qu'il a pris en considération l'ensemble des paramètres qui penchaient dans un sens ou dans l'autre tels que la fatigue, la faim, etc. et qu'au vu de tout cela, il a fait une délibération libre qui l'a amené à *choisir* de sauter, alors qu'il aurait tout aussi bien pu *choisir* de ne pas sauter. Il est possible de considérer que ce choix se situe à un autre niveau que le simple poids dans la balance de chaque paramètre, qu'il en est détaché, et que c'est « quelque chose »

1 Cole, Blaine J., 1995. « Fractal time in animal behaviour: the movement activity of *Drosophila* ». In : *Animal Behaviour*, 50(5), 1317-1324

2 Kelly, Ruth *et al.*, 2014. « Historical data reveal power-law dispersal patterns of invasive aquatic species ». In : *Ecography*, 37(6), 581-590.

3 Cours d'épistémologie de Baptiste Morizot.

d'indépendant qui tranche finalement. Ce « quelque chose », je l'appellerai volonté.

Il est évident que certains êtres vivants ne sont pas doués de volonté, par exemple, personne ne défendrait cela pour les bactéries ou les méduses. Cependant, en observant le comportement de certains animaux dotés d'un cerveau plus complexe, on peut se poser la question. Nous-mêmes, nous avons bien l'impression de délibérer avec un « quelque chose » d'indépendant par rapport aux objets de la délibération, et de pouvoir même observer cette délibération, donc utiliser un autre « quelque chose » d'indépendant. Puisque la conscience est émergente, il se peut très bien qu'elle revête des propriétés qui ne se trouvent pas dans le reste de la nature, notamment celle d'engendrer une forme de hasard plus puissante que celle du hasard mécanique, car plus imprévisible.

B. L'indétermination en mécanique quantique ou le hasard primordial

1. Eléments d'introduction

1.1. Spécificité de l'indétermination en mécanique quantique

Jusqu'ici, j'ai beaucoup parlé de hasard en physique, et je continuerai dans ce cadre à utiliser ce terme de la façon dont je l'ai employé ci-dessus. En l'occurrence, il désigne d'une part les processus dépendant d'un trop grand nombre de petits événements pour les prendre en compte individuellement et d'autre part les processus pour lesquels des causes trop petites pour être mesurées peuvent entraîner des effets disproportionnés. Dans ces deux cas, le mot hasard est utilisé pour désigner une chaîne causale dont nous n'avons pas les moyens d'étudier les maillons, il est une sorte de boîte noire. Il est, pour reprendre les termes de Poincaré, la mesure de notre ignorance¹.

Mais, comme ce dernier le fait remarquer, ce n'est pas parce que nous reconnaissons notre incapacité à connaître les lois qui le régissent que nous considérons qu'il n'y en a pas. Nous savons, en observant les phénomènes, qu'ils doivent répondre d'une logique qui nous est inconnue, que nous comprendrons peut-être un jour, et qu'un être aux capacités mentales supérieures aux nôtres pourrait comprendre. Pour un être omniscient, le hasard en ce sens n'existerait pas. Muni des seules données du premier instant de l'Univers ou d'un instant quelconque, il pourrait déduire le déroulement du futur entier.

Mais pouvons-nous imaginer une forme de hasard d'un tout autre ordre, un processus dont même un être omniscient ne pourrait pas prévoir l'issue ? J'ai évoqué plus haut la capacité chez certains êtres vivants de créer un phénomène de ce type, mais ici, seul le monde des corps inertes est considéré pour y envisager ce hasard. Il serait à rapprocher du *clinamen* d'Epicure et Lucrèce. Ceci supposerait qu'aucune chaîne causale sous-jacente n'existe pour ce processus, et que, puisque son issue est indéterminée, aucune loi ne le régit. Il est quelque peu désorientant, mais cependant possible, de l'imaginer.

1 Poincaré, Henri, *op. cit.*

Selon l'interprétation la plus répandue actuellement de la mécanique quantique, telle est la nature des processus qu'elle décrit. C'est ce que Wolfgang Pauli appelle les « probabilités primordiales » en référence au formalisme prédictif qui s'énonce en termes de probabilités. Ce hasard qui n'est plus la mesure de notre ignorance des lois mais celle de l'inexistence des lois, je le désignerai par « indétermination ». Le mot « indéterminisme » sera employé ici, de même qu'on le trouve chez Bitbol¹ par exemple, au sens d'une vision du monde dans laquelle on accepte l'existence d'une indétermination ontologique.

Pour citer quelques exemples de processus censément indéterminés, on peut noter la désintégration des atomes ou des particules subatomiques, dont le temps de vie moyen est toujours conservé sur un grand nombre de cas, mais dont rien ne permet de prévoir pour une particule ou un atome seuls à quel moment se produira sa désintégration. La plupart des grandeurs qui caractérisent l'état des particules quantiques ont également une valeur indéterminée (on dira aussi qu'elles sont dans un état qui est une superposition de tous les états possibles, pondérés chacun par un certain pourcentage de probabilité), et cette valeur n'est fixée que par l'intervention d'une mesure. Une autre propriété étrange de la mesure est d'interdire la détermination simultanée de couples de grandeurs : lorsque l'on fixe l'une des deux grandeurs du couple par la mesure, il est impossible de fixer la deuxième sauf en perdant l'information sur la première. Cette propriété est appelée principe d'incertitude de Heisenberg, à tort, d'après la physicienne Catherine Chevalley, qui le qualifierait plutôt de « principe d'indétermination »² du fait de la nature du couplage des deux grandeurs qui engendre bien une indétermination et non une incertitude sur l'une des deux. Cette remarque n'est d'ailleurs pas rare de la part des physiciens qui enseignent pour la première fois ce principe à leurs élèves, et on dit que Heisenberg lui-même s'était rendu compte de l'ambiguïté du nom qu'il avait donné à son principe et aurait préféré le modifier, mais que l'utilisation de ce principe sous ce nom s'était déjà répandue trop rapidement pour cela. Le principe « d'incertitude » de Heisenberg, donc, s'écrit généralement comme suit :

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq \frac{h}{2\pi}$$

Où Δx est la précision de la mesure (de manière générale, le signe Δ représente l'amplitude de variation de la grandeur qu'il précède) sur la valeur de la position x de la particule, Δp celle sur la valeur de son impulsion p et h la constante de Planck (d'une valeur de l'ordre de la 34^{ème} décimale). On oppose aussi régulièrement de cette façon le couple énergie – temps.

1 MB.

2 Chevalley, Catherine, « Une nouvelle science ». In : MQ p. 39.

Elle est la première propriété d'indétermination à avoir été mise en évidence, en 1928, par Werner Heisenberg, et a donné lieu à d'importants débats dans la communauté scientifique de l'époque, notamment lors des premiers congrès Solvay¹. La propension des scientifiques à accepter ou non un tel changement de paradigme a surtout dépendu de leurs convictions philosophiques sur le rôle des mathématiques en physique, car la démonstration de ce principe est bien mathématique, et sur la capacité de la physique même à nous renseigner sur une réalité objective des choses.

1.2. Eléments historiques : points de vue philosophiques des principaux fondateurs de la mécanique quantique

Le physicien Franco Selleri attribue dans son *Grand débat de la théorie quantique* à l'opposition entre Max Planck et Arnold Sommerfeld la première grande divergence de points de vue sur l'interprétation de la réalité physique qui aurait un impact sur la mécanique quantique encore à l'état embryonnaire.

Planck considérait en effet que le monde physique existait, que nos images mentales du monde étaient vraies et qu'il existait une causalité dans les processus physiques. Il nuancait tout de même ce point de vue par l'idée que ce monde réel n'était pas exactement le même que celui des sens. Le raisonnement pur permettait par contre d'avoir un aperçu du monde réel car les lois des raisonnements coïncidaient avec celles qui gouvernent la succession des impressions que nous recevons du monde réel. Il voyait aussi une preuve de l'harmonie entre le monde réel et le monde des sens par le fait d'être capable de soumettre les événements futurs à notre évaluation et notre volonté.

Sommerfeld quant à lui était positiviste, il se satisfaisait de mettre en équations, d'appliquer des techniques mathématiques aux problèmes physiques sans en aborder les aspects « métaphysiques » (ce qui dans le langage des positivistes signifie « philosophiques »).

C'est dans la lignée de ce point de vue que s'est située l'interprétation dominante de la mécanique quantique à l'époque, dite interprétation de Copenhague (parfois de Göttingen), qui rassemblait notamment les célèbres physiciens Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born et Paul Dirac. C'était initialement l'interprétation de Bohr, légèrement déformée ensuite lorsque popularisée par

¹ On peut s'en rendre compte en lisant notamment : Bohr, Niels, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gallimard, 1991.

Heisenberg, dont le point de vue différait sur quelques points du premier.

La spécificité du processus de mesure était au centre du point de vue de Bohr. En effet, c'était selon lui le fait que l'intelligence humaine pose une question à la Nature par l'intermédiaire de la mesure qui introduisait un « choix » fondamentalement aléatoire de l'état du système, auparavant décrit par l'équation de Schrödinger déterministe. Surtout, il ne fallait pas chercher à comprendre le mécanisme de ce choix : il prenait la mesure comme une boîte noire qui changeait la nature des processus physiques de façon inintelligible à l'homme. Bohr avait une idée très claire de cette interprétation, correspondant à sa vision pessimiste de l'accès à la connaissance du réel, et il a beaucoup écrit à ce propos. Pour illustrer son point de vue, je reprendrai quelques-unes de ses déclarations citées dans le livre de Franck Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* :

« Il n'existe pas de monde quantique. Il n'existe qu'une description physique abstraite. Il est faux de penser que la tâche de la physique est de découvrir comment la Nature est réellement. Ce qui concerne la physique est ce que nous pouvons dire sur la Nature.¹ »

Et puisque l'ensemble du dispositif expérimental était vu comme une boîte noire, il y avait lieu de le considérer dans son entièreté pour toute description : « on peut plaider vigoureusement pour une limitation de l'usage du mot phénomène au cas où il se réfère exclusivement à des observations, obtenues dans des circonstances bien spécifiées, incluant une description de l'ensemble de l'expérience² ». L'état d'un système était donc inséparable de son contexte expérimental.

Il existait pour Bohr une barrière infranchissable entre le monde réel (la Nature) et celui que nous percevons, un point de vue qui est à rapprocher de celui de Kant, certains (comme Selleri³) le considèrent également comme un positiviste.

Heisenberg est allé plus loin encore, jusqu'à remettre en question l'existence même de cette Nature dans son livre *Physics and Philosophy* : « Les atomes ou les particules élémentaires ne sont pas réels : ils forment un monde de potentialités ou de possibilités, plutôt qu'un monde de choses et de faits ». Et également :

Nous ne pouvons complètement objectiver le résultat d'une observation, nous ne pouvons décrire ce qui se produit entre cette observation et la suivante. (...) En conséquence, la transition entre le 'possible' et le 'réalisé' se produit pendant l'acte d'observation. Si nous voulons décrire ce qui se produit pendant un événement atomique, nous devons réaliser que le mot 'se produit' ne peut

1 Cité par Petersen, Aage, 1963, et repris dans FL p. 56.

2 Bohr, Niels, 1948. Cité dans FL p. 56.

3 FS, p. 34.

s'appliquer qu'à l'observation, et pas à l'état des choses entre les deux observations.¹

Lorsque Heisenberg mentionne le fait que les particules ne *sont* pas réelles, il utilise d'après Bitbol un vocabulaire ontologique², ce qu'on peut interpréter comme le fait qu'il donne un statut de réalité au monde de potentialités, un monde mathématique, à défaut d'en donner une aux corps. Nous serions donc ceux qui créent la réalité en créant des modèles.

Les points de vue des physiciens que l'on classe dans l'interprétation de Copenhague divergeaient donc légèrement, mais tous se caractérisaient par un pessimisme à l'égard de la connaissance que nous pouvons avoir d'une réalité objective, voire par un désintérêt par rapport à celle-ci, comme celui de Dirac, selon lequel « *le seul objet de la physique théorique est de calculer des résultats qui peuvent être comparés avec l'expérience*, et il est tout à fait inutile de donner une description globale de l'ensemble du phénomène ».³ On peut aussi citer comme faisant partie de ce groupe les physiciens Pascual Jordan et Wolfgang Pauli.

À ce point de vue s'opposaient principalement Albert Einstein, Erwin Schrödinger et Louis de Broglie, bien que ces deux derniers y aient adhéré épisodiquement avant de revenir sur leurs positions. Pour les besoins de ce travail, le terme « réaliste » sera utilisé au sens de l'opinion selon laquelle il existe une réalité objective et qu'il nous est possible de l'atteindre, du moins partiellement.

Einstein avait un point de vue plutôt réaliste au sens des rapports réels, assez proche de celui d'un Poincaré dont on excluait l'aspect conventionnaliste⁴. C'est pour cette raison que l'idée de se contenter d'un indéterminisme ne lui suffisait pas, car ce n'était pas là représenter la réalité, c'était accepter que l'on ne puisse pas le faire. De l'interprétation à laquelle il s'opposait, il disait : « la philosophie rassurante de Heisenberg – ou est-ce une religion ? – est construite de façon tellement subtile que, pour le moment, elle fournit un oreiller de paresse pour le véritable croyant, oreiller d'où il n'est pas possible de le réveiller ».⁵

Il considérait que le modèle quantique n'était pas un aboutissement, qu'il n'était pas assez

1 W. Heisenberg, 1958.

2 MB, p. 28.

3 Dirac, Paul A. M., 1930, p. 7. Cité dans FL p. 58.

4 Dans Einstein, Albert, *La géométrie et l'expérience*, Paris, Gauthier-Villars, 1921, Einstein annonce qu'il est d'avis que la conception de Poincaré est parfaitement juste dans le sens où ce qui est soumis au contrôle de l'expérience et donc réel est ce qui est commun à la géométrie (modèle) et aux lois physiques (réalité), et ce qui leur est commun sont les rapports entre leurs objets. Cependant, Einstein ne considère ceci que pour les modèles qui sont vrais, et par exemple, la géométrie euclidienne ne l'est pas (alors que pour Poincaré, à la fois la géométrie euclidienne et la géométrie riemannienne le sont, car toutes les conventions sont vraies, la seule différence étant qu'elles ne sont pas toutes aussi fructueuses).

5 Lettre d'Einstein à Schrödinger du 31 mai 1928, traduite en français dans Balibar, Françoise, Darrigol, O., Jech B., 1989, p. 213. Cité dans FL p. 58.

satisfaisant en tant que réponse aux exigences de compréhension du monde à cette échelle pour être considéré comme achevé. La théorie de l'époque n'était d'ailleurs pas encore compatible avec sa propre théorie de la relativité, et elle ne l'est aujourd'hui que de manière précaire par l'intermédiaire de la théorie quantique des champs, à propos de laquelle la communauté scientifique est divisée. C'est pourquoi durant la période de sa vie qui a suivi la formalisation de la théorie quantique, il s'est notamment consacré à tenter de la compléter et a apporté une importante contribution conceptuelle.

Schrödinger possédait de nombreux centres d'intérêt dans des domaines très variés (philosophie, biologie, histoire, politique) en dehors de la physique, ce qui lui permettait peut-être d'avoir un point de vue plus externe. Il a beaucoup insisté sur la compréhensibilité de la physique, qui impliquait pour lui la possibilité de construire des images mentales de la réalité. Il avait un point de vue philosophique proche du réalisme qu'on qualifie aujourd'hui de « naïf », selon lequel le monde se donne à nos sens et à notre intelligence tel qu'il est réellement.

À propos du déterminisme, il répondait ainsi à la question de savoir si le comportement d'un atome seul est déterministe : « Il n'y a probablement pas moyen d'en décider expérimentalement. Par le raisonnement pur, il nous est évidemment permis de dériver le hasard de lois, ou les lois du hasard, selon notre préférence »¹. En d'autres termes, il considérait que les lois du hasard étaient du domaine du raisonnement mais pas forcément de celui du réel. À propos de l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, il l'a acceptée « comme un expédient intérimaire de solution »² entre 1928 et 1933, mais son rôle philosophique historique est clairement du côté de l'opposition. Il était surtout opposé au concept de dualité onde-corpuscule de la lumière, il a tenté très longtemps de mettre en place un modèle uniquement ondulatoire.

L. de Broglie était sceptique à propos des théories philosophiques proprement dites car il les disait fragiles³, mais il s'intéressait aux idées générales en physique et croyait à la réalité du monde physique. Il se définissait lui-même plutôt comme un réaliste.

À propos de la mécanique quantique au sens de Copenhague, il disait qu'elle abusait des « explications purement verbales qui sont de véritables refus d'explication » contraires aux principes d'une « saine méthode scientifique »⁴. Il l'a cependant acceptée, de même que l'avait fait Schrödinger, entre 1928 et 1952, avant de reprendre sa tentative de la réinterpréter d'une façon plus matérialiste en termes d'ondes réelles.

1 Schrödinger, Erwin, 1928, p. 50. Cité dans FS, p. 31.

2 Schrödinger, Erwin dans George, André, 1953, p. 20.

3 Citation extraite d'une interview consignée dans les archives de Niels Bohr, reprise dans FS p. 35-36.

4 de Broglie, Louis, 1963. Cité dans FS, p. 37.

Il faut également mentionner Paul Ehrenfest, ami proche d'Einstein qui croyait aussi dans une réalité objective, et que l'inadéquation entre ses convictions et ce qu'il devait enseigner à ses étudiants a sans doute partiellement contribué à pousser au suicide en 1933.¹

1.3. Qu'appellerons-nous « interprétation » ?

Ce que les points de vues et options philosophiques présentés plus haut mettent en jeu, ce n'est pas la théorie elle-même en tant que formalisme, ce sont les critères qui seront requis afin de l'interpréter. Ces critères engendrent une définition variable de l'interprétation.

Tout d'abord, il est à noter que l'interprétation dont il est question lorsque l'on parle de mécanique quantique est le plus souvent une interprétation au sens scientifique, associée au contenu même d'une théorie, et non au sens historique ou littéraire, qui serait associé à l'état psychologique ou social de l'auteur d'une œuvre. L'interprétation s'applique donc ici aux faits de la théorie, c'est-à-dire à l'ensemble des éléments mathématiques déduits et des expériences réalisées dans son cadre.

Il existe sans doute de nombreuses définitions de l'interprétation d'une théorie, mais il en ressort trois principales au sein de la population scientifique actuelle.²

Premièrement, on peut en donner une définition opérationnelle : interpréter serait fournir tous les éléments permettant de réaliser expérimentalement les résultats prédits par le formalisme mathématique. Cette définition suffirait aux positivistes et aux sceptiques, qui ne considèrent pas qu'il soit possible d'aller plus loin dans l'approche de la réalité.

Deuxièmement, on peut considérer l'interprétation comme une fonction qui attacherait à chaque partie de la théorie un ensemble d'objets (mathématiques ou physiques) et les relations qui les lient, de sorte que l'ensemble de la théorie puisse être formulée en ces termes. Interpréter serait ici permettre de concevoir des objets d'application, qu'ils soient concrets ou abstraits, phénomènes ou en-soi. Cette définition est la plus répandue et est celle que l'on utilise lorsque l'on parle d'interprétation de Copenhague.

Troisièmement, on peut donner une définition plus exigeante de l'interprétation, qui serait le processus par lequel on parvient à une image mentale du monde à partir d'une théorie. Puisqu'il ne

1 D'après Einstein, Albert, 1934. Cité dans FS, p. 24.

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

s'agit plus ici de concevoir mais d'imaginer, il serait beaucoup plus difficile de fournir une interprétation complète de certaines théories, dont la mécanique quantique. En effet, certains processus tels qu'ils sont décrits communément en mécanique quantique ne peuvent être envisagés autrement que comme des mots sur le papier, et provoquent une impression de contradiction lorsque l'on tente d'en produire une image mentale. Cependant, il paraît difficile également de manipuler sans erreur des objets dont on ne peut même pas se faire une idée concrète, car alors, comment savoir si l'on aboutit à une contradiction dans le cas où celle-ci ne serait pas explicite dans les termes de la théorie ? Ne serait-ce pas une exigence de clarté qui permettrait d'éviter de se perdre dans une infinité de calculs alors même que l'ensemble de cette démarche pourrait se retrouver réduit à néant s'il s'avère que la théorie doit être reformulée d'une tout autre façon, ou remplacée par une nouvelle ? D'autre part, on pourrait défendre que ce n'est qu'ainsi que l'on peut atteindre une compréhension profonde de la composition et du fonctionnement du monde, car une compréhension qui se contenterait d'énoncer des termes et d'explicitier une logique, bien que suffisante pour l'appliquer, resterait tout de même superficielle. Or, la compréhension est bien le rôle principal d'une interprétation.

Pour cette raison, c'est cette dernière définition que je tenterai d'employer dans ce mémoire, et d'appliquer aux situations habituellement décrites à l'aide de la deuxième définition donnée plus haut. Tout d'abord, il apparaît que certains concepts philosophiques semblent incompatibles avec cette dernière, et c'est ce que je vais à présent exposer.

2. Conséquences d'un indéterminisme ontologique sur les concepts philosophiques

2.1. Indéterminisme et identité

Un problème qui se pose tout de suite lorsque l'on passe du monde macroscopique au monde quantique tel qu'il est interprété actuellement est celui de l'identité. Il est entendu que cette question est assez épineuse en philosophie, et qu'il serait très difficile d'en donner une définition générale, qui prenne en compte à la fois l'identité des corps mais aussi celle des concepts et des objets métaphysiques, cela pourrait faire l'objet d'une étude complète. Je tenterai ici, du moins, d'en aborder une partie seulement, celle qui entre généralement en jeu dans la physique, en adoptant

comme présupposé qu'il soit possible d'aborder toutes les questions de mécanique quantique uniquement dans le cadre de cette définition partielle. En d'autres termes, ce que je considérerai ici est la définition de l'identité matérielle.

Tout d'abord, il n'est pas dénué d'intérêt de se demander si la théorie physique est réellement compétente pour définir l'identité des objets qu'elle utilise. Certains pourraient dire en effet que cette question sort de son domaine d'application qui ne comprend que les interactions entre ces objets. Cependant, il me semble que l'objectif de la science physique est de comprendre le monde matériel dans son ensemble (excepté le phénomène émergent de cette matière qu'est le vivant, dont les lois sont quelquefois très différentes), et que pour prétendre comprendre le monde, il est nécessaire de le définir d'abord. Si l'on refuse de se contenter d'une image floue, les critères de l'identité matérielle sont inextricablement liés à la définition de la matière. Il ne me semble pas aberrant d'exiger que la description de la composition du monde et celle de son fonctionnement soient exprimées dans le même langage, qui sera celui de la physique. C'est d'ailleurs en cela qu'à mon sens, les mathématiques ne peuvent pas être le langage exhaustif de la physique, elles n'en sont qu'une partie, l'autre partie étant le langage du sens commun qui permet de créer des images mentales. D'après Castoriadis (qui considère, comme évoqué plus haut, que les limites de la science et de la philosophie sont estompées par les transformations de la physique moderne) les questions de ce type ne relèvent : « (...) ni de pré-, ni de métaphysique. Ces questions ne viennent ni avant ni après la physique contemporaine, elle *sont* la physique contemporaine. »¹

Reprenons donc la question de l'identité matérielle, en commençant par ce qu'il en était avant l'introduction de l'échelle quantique.

Dans le monde macroscopique, l'identité matérielle se définit en considérant l'apparente unicité des corps macroscopiques, auxquels on peut la plupart du temps définir une limitation dans l'espace et pour lesquels on ne prend pas en compte le caractère lacunaire de leur constitution, c'est-à-dire le fait qu'ils soient essentiellement constitués de vide, ni le fait qu'ils ne doivent leur propriété volumique qu'aux forces atomiques maintenant les distances entre les corpuscules qui les composent. De par cette apparente unicité, on attribue aux corps une localisation dans l'espace. Il est à noter également que les corps macroscopiques semblent évoluer dans un temps commun (ce que la relativité restreinte a démontré être inexact, mais qui découle de notre propre sensation du passage du temps).

De manière communément admise, le concept d'identité d'un phénomène se sépare en deux

1 C. Castoriadis, *Les carrefours du labyrinthe*, Paris, Seuil, 1978 ; rééd. Coll. « Points Essais », 1998, p. 207.

facettes : le fait d'être un, non confondu avec ce qui lui est extérieur et permanent dans le temps (identité de nombre), et le fait d'être soi-même, qui regroupe ses caractéristiques discriminantes par rapport aux autres phénomènes (identité de genre). En se plaçant dans une optique réaliste (entendons ici : en considérant qu'il existe une réalité objective), nous choisirons de donner la définition de l'identité matérielle du philosophe John Locke¹. On peut la résumer ainsi : l'identité matérielle de nombre est déterminée par le fait d'être à un endroit à un instant donné. En effet, si un corps est séparé en deux, ces deux parties acquièrent une identité propre, et si deux corps matériels sont confondus en un même endroit, ils ne forment en réalité qu'un. Exprimé autrement, il s'agit d'avoir un même commencement d'existence en un même lieu. (Imaginons que deux corps se retrouvent confondus, ils sont indiscernables et cela marque le commencement de l'existence du corps qui est l'ensemble des deux. De même, si un corps est séparé en deux, cela marque le commencement de l'existence de ses parties). Locke définit aussi des critères d'identité pour les plantes, les animaux et les humains (identité de genre), qui l'amènent à faire intervenir le concept de conscience, mais dont nous ne discuterons pas ici.

Ces critères ne sont contradictoires ni avec une vision idéaliste au sens kantien (à condition de les appliquer uniquement aux phénomènes) ni avec une vision platonicienne du monde. Il serait cependant difficile de les adapter à une vision du monde sceptique – nous supposons qu'un sceptique dirait qu'il n'existe pas de critère d'identité.

Si l'on revient à la définition réaliste de l'identité matérielle et que l'on tente de la transposer à des corpuscules agissant de manière aléatoire, plusieurs problèmes se posent.

Imaginons tout d'abord la situation d'un atome d'hydrogène que l'on bombarderait avec un photon de longueur d'onde correspondante à l'énergie d'excitation de cet atome. Il est généralement admis parmi les physiciens qu'il est impossible de déterminer si ce photon interagira ou non avec un électron de cet atome, et donc l'excitera ou non, en raisonnant comme si lui-même ou l'obstacle qu'il va rencontrer avaient une trajectoire déterminée. Mathématiquement, on représente cette probabilité d'interaction par une section efficace, c'est-à-dire la surface que devrait avoir chacune des deux particules s'il était possible qu'elles soient pleines et impénétrables de façon à pouvoir entrer en contact au sens macroscopique du terme. Si ces surfaces fictives sont grandes, elles auront une grande probabilité d'entrer en contact, alors que si elles sont petites, la particule projectile risque fort de « rater » la particule cible. Mais cette surface ne permet de visualiser aucune réalité concrète puisque les deux particules ne sont que des regroupements de nombres quantiques (valeurs que

1 Locke, John, *Essai sur l'entendement humain*, livre II, Chapitre XXVII, traduit par Balibar, Étienne dans *John Locke. Identité et différence. L'invention de la conscience*, Paris, Seuil, 1998, p. 133, 135.

prennent les grandeurs quantiques pour cette particule, la plus connue étant sans doute le spin) sans volume ni surface, et que l'on ne peut parler que d'une « interaction » (à distance) en guise de contact.

L'électron à l'intérieur de l'atome et le photon entrant dans l'atome n'ont donc d'après l'interprétation de Copenhague aucune position précise avant l'interaction ; leur position ne peut être définie autrement que par une distribution de probabilités, une espèce de « nuage continu de positions possibles ». Difficile de baser un critère d'identité sur quelque chose d'aussi indéterminé.

D'autre part, si on considère que l'objet réel est la fonction d'onde, dont l'intégrale du carré sur une portion de l'espace correspond à une distribution de probabilité, on ne peut pas dire que l'objet réel ait une position dans l'espace puisqu'il n'existe que dans un espace mathématique (la fonction d'onde telle que décrite dans l'interprétation de Copenhague ne pourrait pas exister dans un simple espace-temps à quatre dimensions), donc même s'il existait une possibilité de définir la notion de position à cette échelle, celle-ci ne pourrait entrer en jeu dans la définition de l'identité matérielle de l'objet réel (qui est la fonction d'onde). Et la définition d'une identité uniquement mathématique sans composante matérielle n'est pas satisfaisante du point de vue réaliste.

Enfin, il faut ajouter que l'indéterminisme n'est que l'un des problèmes qui remettent en cause les notions pré-requises pour définir l'identité matérielle à cette échelle, il existe également des situations où deux régions de l'espace séparées sont décrites par la même fonction d'onde (états intriqués), c'est-à-dire qu'un même objet serait en deux endroits différents, sans parler du fait que selon la relativité générale, parler de position dans l'espace et de temps commun à tous les corps n'a plus vraiment de sens.

Pour ce qui est de la deuxième formulation du critère d'identité matérielle, à partir du commencement d'existence, elle devient caduque du fait que les particules sont parfois produites simultanément par la même source. Par exemple, la désexcitation d'un atome de plusieurs niveaux d'énergie d'un coup émet plusieurs photons simultanés. On considère qu'ils sont multiples du fait que l'énergie totale du faisceau émis est un multiple de l'énergie minimale qui est celle du photon.

On peut conclure de tout ceci que si l'on s'en tient à l'interprétation de Copenhague, la seule identité qu'il soit possible de définir au niveau microscopique est une identité mathématique, en tant qu'objet mathématique, et que l'identité matérielle n'existe plus à cette échelle. Ce concept est uniquement macroscopique.

Bien sûr, il existe aussi dans le monde macroscopique des choses dont on ne peut définir l'identité. Par exemple les unités de mesure : on ne dit pas d'un mètre qu'il est lui-même. Mais il apparaît à

présent que même lorsque l'identité matérielle macroscopique est définie, elle revêt une étrange forme qui est celle d'être émergente. En effet, quel que soit le dessin du monde subatomique qui le compose, le monde macroscopique n'en est pas ébranlé. Comme le fait remarquer Bitbol¹, toutes les possibilités de propriétés premières (celles des composants) se ramènent aux mêmes propriétés secondaires (celles des composés), telles que le goût, l'odeur ou la couleur des objets. Il n'y a donc pas de lien entre les propriétés primaires et secondaires, ces dernières sont émergentes.

2.2. Indéterminisme et causalité

Le vieux problème de la causalité est rafraîchi, depuis l'avènement de la mécanique quantique, par de nouvelles données : on prétend qu'il existe une réelle contingence dans les faits, qui est cette fois indéniable même pour ceux qui n'en voyaient pas dans la liberté humaine.

Lorsqu'Einstein refusait d'accepter que les électrons « choisissent » d'interagir ou non², il mettait le doigt sur le fait que la seule situation contingente que l'on pouvait jusqu'alors trouver, si tant était qu'on accepte l'existence d'une contingence, était celle d'un choix, d'un recours à la volonté. C'est pour cette raison que l'existence d'une contingence dans le mouvement des électrons menait à considérer qu'il y avait quelque part un choix. Selon Bohr, ce choix était celui de l'expérimentateur, selon Dirac celui de la Nature. Cependant, si l'on n'accepte ni le subjectivisme de la vision de Bohr, ni l'idée d'une Nature douée de volonté, il n'est plus pertinent de parler de « choix ».

Dans ce cas, on se retrouve face à l'existence d'une transition entre deux événements qui n'est due ni à une nécessité ni à une volonté. Cela revient-il à dire que l'événement produit est « sans cause » ? Tout dépend de la définition que l'on a de la cause.

La définition de David Hume, par exemple, selon laquelle la relation de causalité est une interprétation humaine basée sur l'association habituelle de deux événements, n'est plus suffisante à cette échelle, car il n'y a justement plus d'habitude.

Les critères de Kant, c'est-à-dire l'universalité et la nécessité de l'implication de l'effet par la cause n'est plus de mise non plus, car il n'y a plus ni universalité ni nécessité dans les effets.

Même sans parler d'universalité, la simple utilisation commune du mot, en tant qu'un effet est la

1 MB, p. 28.

2 Einstein, Albert, *Albert Einstein/Max Born Briefwechsel 1916-1955*, Munich, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH., 1969, traduction de P. Leccia, *Albert Einstein/Max Born : Correspondance 1916-1955*, Seuil, 1972, p. 98.

résultante d'un certain nombre de facteurs singuliers qui l'engendrent de par le fait qu'ils se produisent, n'est pas satisfaisante car le simple fait qu'ils se produisent ne garantit pas l'apparition de l'effet.

La définition de la cause efficiente d'Aristote, quant à elle, n'inclut de contingence que lorsqu'il s'agit de décisions humaines : lorsqu'on énonce une proposition future, elle peut être vraie ou fausse si elle concerne les choses, mais elle est indéterminée, ni vraie ni fausse, si l'humain y entre en jeu.¹ Il ne faisait pas reposer cette liberté, comme Lucrèce après lui, sur une propriété de la matière élémentaire, mais la voyait plutôt comme une qualité émergente limitée au corps humain.²

Tentons de donner une définition logique de la cause. Nommons A une situation et B la situation qui succède à A.

Si l'on dit que A est une condition suffisante mais pas contraignante pour B, que A implique B, cela pourrait en faire une cause logique de B. A pourrait logiquement être une condition suffisante pour d'autres événements que B, ce qui conserve le prérequis de l'indéterminisme (précisons bien qu'aucun facteur extérieur n'influence le fait que A entraîne B ou bien C). Cependant, en transposant cela à la physique, on constate que lorsque l'on prend soin de remonter au niveau le plus fondamental, le cas d'une situation exactement identique produite par deux situations initiales différentes ne se présente jamais, on dira que les situations initiales sont en fait la même situation. Ceci découle du fait que les atomes sont interchangeable. Reprenons l'exemple de l'atome pris pour cible par un photon et qui interagit avec celui-ci. On peut obtenir exactement la même interaction, la même excitation avec un autre photon à la place de celui que l'on vient d'imaginer. Mais ce photon, puisque dépourvu d'identité propre, est exactement le même que le précédent, ce n'est donc pas une situation différente.

On trouve également un excellent exemple classique du fait qu'il n'existe pas en pratique de contingence dans les causes pour un effet particulier chez Poincaré, je cite :

Nous savons qu'en vertu du principe de Carnot, les phénomènes physiques sont irréversibles et que le monde tend vers l'uniformité. Quand deux corps de température différente sont en présence, le plus chaud cède de la chaleur au plus froid ; nous pouvons donc prévoir que les températures s'égaliseront. Mais une fois que les températures seront devenues égales, si on nous interroge sur l'état antérieur, que pourrions-nous répondre ? Nous dirons bien que l'un des corps était chaud et l'autre froid, mais nous ne pourrions pas deviner lequel des deux était autrefois le plus chaud.

Et cependant, en réalité, les températures n'arrivent jamais à l'égalité parfaite. La différence des températures tend seulement vers zéro d'une façon asymptotique. Il arrive alors un moment où nos

1 Aristote, *De l'Interprétation*, 9, 18a28-19b4.

2 Lucrèce, *De natura rerum*, livre II, v. 216.

thermomètres sont impuissants à la déceler. Mais si nous avons des thermomètres mille fois, cent mille fois plus sensibles, nous reconnâtrions qu'il subsiste encore une petite différence, et que l'un des corps est resté un peu plus chaud que l'autre ; et alors nous pourrions affirmer que c'est celui-là qui a été autrefois beaucoup plus chaud que l'autre.¹

Nous dirons donc qu'il est plus adapté d'ajouter une implication plus restrictive à cette définition, qui devient : A est la cause de B si A est la condition nécessaire à B. Ceci ne veut pas dire que si A est réalisé, B est réalisé, car A peut aussi être la condition nécessaire à C. Cependant, cela garantit que si B est réalisé, alors forcément A a dû être réalisé. On conserve la causalité, mais seulement rétrospectivement : il est impossible de prévoir l'effet à partir de la cause, comme l'avait fait remarquer Hume dans un autre contexte (car lui prétendait démontrer cela pour les objets macroscopiques), mais là n'est pas la partie la plus intéressante de la causalité : ce qu'il est important au point de vue conceptuel de conserver dans la causalité, c'est l'explication après que l'effet se soit produit de ce qui en a été la cause. C'est là la seule chose qui en donne la compréhension. Quant à la prédiction, elle est surtout utile à la technique, or, grâce au formalisme mathématique de la mécanique quantique, on parvient à la reconstituer en utilisant des probabilités, qui sont satisfaisantes pour un usage technique.

Ce concept de cause est *épuré* par rapport à celui auquel on donnerait spontanément le synonyme de « raison pour laquelle ». Ce dernier implique qu'il y ait un « choix » quelque part, et j'utilise ici le mot « choix » au sens large, en y comprenant d'une part la volonté du vivant et d'autre part les lois inscrites dans le monde inerte, qui auraient pu être autres mais qui sont ce qu'elles sont. Il n'y a pas de loi de l'indétermination comme on parle de lois du hasard. Lorsque le photon traverse l'atome, il n'y a pas de raison à ce qu'il interagisse avec l'électron ou pas. Par contre, après qu'on a constaté l'effet, par exemple qu'il a été absorbé, on peut dire que la cause de cette déviation est qu'il a interagi, et la cause de son interaction est qu'il est passé à portée d'interaction et la cause de ce passage est qu'il a été émis dans cette direction, etc. Bien sûr, s'il n'est pas absorbé, on peut remonter à la même chaîne de causes antérieures et cela constitue une explication tout aussi bonne. Il n'y a pas à proprement parler de rupture dans la chaîne causale, il faut simplement accepter dans ce cas de faire une distinction entre les concepts de causalité et de nécessité. Cette distinction existe déjà par exemple chez tous ceux qui considèrent que l'être humain est libre.

Cette démarche est peut-être à rapprocher de celle de Descartes, qui, d'après Bitbol², s'émancipe de la cause (bien que sa raison à lui soit qu'il considère qu'elle revient en dernier recours à l'impulsion

1 Poincaré, Henri, *Science et méthode*, Livre premier, chap 4, III.

2 MB, p. 22.

divine initiale), et incite à adopter la structure légale. Il s'agit d'adopter un cadre descriptif, que l'on peut symboliser par la propriété : « si A est réalisé, alors on observe B », qui possède une fonction prédictive (car cette propriété sera toujours vérifiée) et une fonction explicative par retournement temporel (en présupposant l'inversibilité des lois physiques) : « B dérive de A ». Cette structure légale est finalement similaire à une forme de causalité logique. La seule différence avec notre définition est que dans cette structure, Descartes ne prévoyait pas de contingence pour la relation entre A et B, mais il ne paraît pas y avoir de contradiction à en ajouter.

2.3. Troisième option pour la bivalence

Bitbol introduit une réflexion sur les conditions de conservation du principe de bivalence, afin de déterminer si celui-ci est réfuté dans le cadre de l'interprétation de Copenhague. Reprenons ici son analyse.

Le principe de bivalence se définit de la sorte : s'il est vérifié, on peut dire pour une proposition factuelle P soit « P est vraie » soit « P est fausse ». Garder une position *indéterminée*, c'est-à-dire considérer comme une troisième partie l'option « P est vraie *ou* fausse », c'est refuser d'inscrire son acte de parole de l'un des deux côtés, mais ce n'est pas forcément refuser le principe lui-même, ce n'est qu'une suspension de son usage dans la pratique de la langue. Bitbol démontre ensuite que le principe n'est invalidé que si la vérité (ou le sens même) des propositions factuelles sur lesquelles reposent en particulier les raisonnements de type *ex post facto* (validation après réalisation de l'événement) dépend des moyens de leur attestation.

En effet, on peut affirmer qu'une proposition future est vraie ou qu'elle est fausse si :

- Soit on est certain que les causes qui déterminent l'événement existent déjà, même si on les ignore (car la bivalence vaut pour le présent pour ces causes et on peut l'étendre au futur par raisonnement déterministe).
- Soit on peut utiliser une argumentation de type *ex post facto*, c'est-à-dire qu'au moment où l'événement s'est produit, on valide rétrospectivement le principe. Cette possibilité ne nécessite pas de déterminisme, elle implique juste qu'un jour le cours des événements fera l'objet d'un constat rétrospectif (qu'on pourra remonter à ce qui a anticipé sur lui). On peut noter que ceci est le type de raisonnement que j'invoque plus haut pour redéfinir la causalité.

Si, cependant, ce constat rétrospectif n'est pas plus applicable que l'invocation de causes déterministes, on peut soit poser par principe que l'événement s'est produit ou ne s'est pas produit mais que l'une de ces deux propositions doit être vraie, soit refuser de le reconnaître sans preuve, mais dans ce cas pour être cohérent, il faut dire qu'en dehors de tout moyen d'attestation possible, il n'est même pas envisageable d'assigner un sens à la proposition factuelle. Et c'est seulement dans ce cas que le principe de bivalence est réellement mis en défaut.

De cette branche de raisonnement peuvent être tirées trois possibilités de vision du monde :

- Celle où le monde est notre œuvre. (Bitbol ne lui accorde aucun intérêt, à part celui d'être une caricature à opposer à certains raisonnements de type sceptique).
- Celle où le fait que les événements s'excluent mutuellement n'est pas prédéterminé comme caractéristique du monde réel, mais est engendré par des structures émergentes de l'organisation de ce monde. Ces structures sont par exemple des appareils de mesure. Puisque l'état des événements est indéterminé en dehors de l'intervention de ces structures et que cette intervention même n'est pas déterministe, il est en effet impossible de construire un raisonnement rétrospectif dans ce cas.
- Celle enfin d'un monde « à l'unité organique », c'est-à-dire où tous les événements sont interdépendants et déterminés strictement par tous les autres. Un expérimentateur qui place son appareil de mesure détermine par la disposition même qu'il choisit l'influence qu'il aura sur le résultat. L'événement auquel on a accès n'est donc pas celui qui serait survenu sans mesure. Il est à préciser que l'expérimentateur également est déterminé par l'ensemble du reste du monde, ceci est une vision entièrement déterministe.

La mécanique quantique au sens de Copenhague se place dans le cadre de la deuxième possibilité, le principe de bivalence est donc réfuté dans cette théorie. Certains physiciens ont tenté d'adapter le formalisme afin de pouvoir y réintégrer ce principe, en l'occurrence R. Omnès et D. Griffiths, en introduisant la notion de « fiabilité ». Il s'agissait d'introduire, entre deux mesures permettant de qualifier une proposition de « vraie » ou « fausse », une proposition dite « fiable », définie ici par le fait que si on effectuait une mesure intermédiaire pour la vérifier, rien ne changerait dans le calcul de probabilités concernant la deuxième mesure à partir des données de la première mesure. En d'autres termes, une proposition « fiable » ne contreviendrait pas au formalisme probabiliste auquel elle serait ajoutée. Griffiths et Omnès comptaient rejoindre par cette notion de « fiable » celle de « vraie », car s'il n'existe qu'une seule possibilité de proposition « fiable », elle doit forcément être « vraie ». En effet, si on constate un premier résultat, puis un second résultat, et qu'il n'existe qu'une seule possibilité d'évolution à partir du premier résultat qui conserve le second, cette possibilité ne

dispute sa probabilité de survenir avec aucune autre, elle a donc une probabilité de 100 % de se produire, c'est-à-dire qu'elle doit forcément être réalisée. Cependant, il se fait qu'en mécanique quantique, il existe généralement plusieurs possibilités de la sorte. On est donc forcé de constater que le critère de fiabilité est beaucoup plus faible que celui de vérité, et que même ainsi il n'est pas possible de rétablir la bivalence.

C. Exploitation des arguments

1. Éléments en faveur d'une indétermination ontologique

1.1. Arguments

L'indéterminisme est un pilier théorique de la mécanique quantique, il est présent dans une large partie de son formalisme, qui doit donc être remise entièrement en question si l'on souhaite réfuter l'indéterminisme. Or, il est légitime de se demander si une telle restructuration est bien nécessaire, car la théorie de la mécanique quantique, en tant que théorie, est consistante et complète. Cela signifie d'une part que l'on peut donner de tous les objets de la théorie une description non-contradictoire, et d'autre part que toute question clairement posée dans le cadre de cette théorie peut être tranchée en utilisant son formalisme. Ceci, bien évidemment, ne garantit pas qu'elle est vraie.

Certains physiciens la considèrent même comme intuitive, mais cette intuition est selon un « concret » mathématique. Les objets d'intuition et de compréhension feraient partie du monde des mathématiques plutôt que du monde mental constitué grâce à nos sens. Mais finalement, il est difficile de justifier le refus de devoir dans certains cas substituer une construction de notre esprit à notre imagination, de devoir nous contenter de concevoir sans imaginer. Soutenir ce refus serait donner une congruence injustifiable au processus d'évolution qui a construit nos sens et donc toutes nos capacités d'imagination. L'évolution de nos capacités de conception, elle, est plus rapide et structurée et elle nous permet déjà de manipuler des objets théoriques sur lesquels nous n'avons aucune prise sensible, comme par exemple des formes géométriques à plus de trois dimensions. Il se pourrait que nous ayons réussi à dépasser notre intuition basée sur les sens par notre conceptualisation et à nous rapprocher ainsi de la réalité.

D'autres estiment qu'il n'est nul besoin d'accorder encore de l'importance à l'intuition et qu'il faut définir un « bon usage » du discours et de la représentation, qui ne doivent plus porter sur des problèmes ontologiques d'identité. Ceux-ci sont bien dans la lignée de Bohr ; cependant, leur démarche semble plus proche d'un renoncement que d'une avancée. Il n'est jamais bon de fixer des limites péremptoires à la réflexion sans savoir ce que l'avenir amènera dans son lot de

connaissances nouvelles.

Un point de vue plus intéressant est celui de Chevalley¹ selon laquelle le problème d'intuition est dû au fait que l'on associe toujours les concepts classiques aux mots qu'on utilise pour décrire la mécanique quantique. On se représente toujours les particules comme des grains de poussière très petits, les ondes comme des vagues sur un lac et le temps comme une flèche continue agrafée sur l'ensemble de l'Univers, et on cherche donc forcément à leur appliquer les concepts habituels. Suffirait-il dans ce cas renommer tous ces objets, réinventer une langue du monde quantique, pour éviter l'association automatique des concepts classiques, puis leur attribuer leur propre ensemble de concepts ? Ou est-ce notre vision du monde entière que nous devons remodeler pour s'affranchir d'une sorte de « préjugé classique » ? Le problème est que la métamorphose de nos concepts classiques en concepts quantiques est souvent difficile. J'ai montré plus haut que certains, en tout cas, tels que l'identité, ne peuvent plus être employés sous aucune forme approchante. Il en résulte une vraie perte. Ne plus associer les concepts classiques aux objets quantiques, d'accord, mais où sont donc les concepts quantiques que nous pourrions utiliser ? Jusqu'ici, ils sont uniquement mathématiques.

1.2. Expériences

Comme on l'a dit, de nombreuses expériences soutiennent l'interprétation indéterministe. Tout d'abord, on ne peut se passer de citer l'expérience la plus célèbre de toute la mécanique quantique : les fentes de Young.

Le dispositif des fentes de Young est le suivant : un faisceau de photons est envoyé sur une plaque percée de deux fentes extrêmement fines et très rapprochées, tracées horizontalement. Un écran est placé derrière cette plaque, sur lequel on observe la figure produite par le passage des photons à travers les deux fentes. Des détecteurs amovibles sont placés juste derrière les deux fentes, et ces dernières sont également munies d'obturateurs.

Lorsque ni les détecteurs ni les obturateurs ne sont en place, on observe sur l'écran une figure d'interférences, c'est-à-dire une alternance de zones éclairées et de zones sombres. Cette figure est due à l'interaction entre la partie du faisceau qui passe par la fente du haut et celle qui passe par la fente du bas. Ces deux faisceaux se rencontrent du fait de la forte diffraction occasionnée par

1 MQ, p. 46.

l'étroitesse des fentes, et subissent un phénomène d'interférence, caractérisé par l'annulation de l'onde résultante en certains points et son amplification en d'autres points, de manière périodique. Cette propriété est caractéristique d'une nature ondulatoire. Cependant, il existe des moyens de faire passer les photons un par un par les fentes, et on constate alors que, bien qu'ils frappent chacun l'écran (ou la plaque photosensible dans ce cas) en un endroit d'apparence aléatoire, lorsqu'on en envoie un grand nombre, leur distribution redessine la même figure d'interférence que lors de l'éclairage par le faisceau complet. On peut donc considérer que chaque photon isolément interagit avec lui-même pour former un phénomène d'interférences, et que seule la mesure (effectuée par la plaque photosensible lorsqu'ils l'impriment) révèle leur nature corpusculaire en affichant une position finale aléatoire. Cet aléatoire doit être réel, car si le photon et l'onde sont le même corps physique, le photon ne peut pas avoir de position précise dans l'espace avant de toucher l'écran, sinon il ne serait pas onde et n'interagirait pas avec lui-même, et puisqu'il n'a pas de position précise avant de toucher l'écran (il s'étend sur tout l'espace sous la forme d'une onde), la détermination de la position qu'il affiche lorsqu'il touche l'écran est de l'ordre de l'aléatoire réel, de l'indéterminisme.

Peut-être n'a-t-on pas accepté à ce stade que le photon soit une onde dans l'espace entre les fentes et l'écran, et estime-t-on qu'il est possible qu'il reste corpusculaire et soit porteur de l'information de la figure d'interférence d'une autre manière. Voyons donc ce qu'il se passe lorsque l'on obture l'une des fentes. Dans ce cas, le photon ne peut passer que par la fente libre, et lorsqu'on effectue l'expérience, on ne constate plus l'apparition d'une figure d'interférence sur l'écran, la figure observée est une distribution statistique normale. Ceci montre que le photon ne porte pas en lui-même l'information de la figure d'interférence. Il doit forcément l'obtenir en interagissant. Et pour cela, il ne peut avoir interagi qu'avec lui-même (aucun autre élément du milieu n'est capable de générer une figure d'interférence avec ce photon, il lui faut un photon issu de la même source et à des instants très proches). Même constat si on place un détecteur derrière l'une des deux fentes : en effectuant une mesure, le détecteur empêche le photon d'être une onde et donc empêche l'apparition de la figure d'interférences, on ne trouvera qu'une distribution normale sur l'écran. On est donc forcé d'accepter le caractère aléatoire de la mesure.

Cette expérience a été vérifiée, répliquée et re-répliquée, ses résultats sont indiscutables, et elle a également été réalisée pour des électrons ; les photons ne sont pas une exception. C'est toute la matière à cette échelle qui doit être regardée comme indéterminée.

Plus récemment, on a pu mettre en évidence la transition d'un état indéterminé à un état déterminé pour l'un des paramètres quantiques : la phase de la fonction d'onde. La phase est homologue à un angle dans le plan complexe, elle est une caractéristique ondulatoire et on peut la définir à la fois

pour les ondes et pour les nombres complexes. Pour une onde longitudinale standard, on peut la voir comme « la hauteur de laquelle démarre la courbe sinusoïdale au départ de l'onde ». Comme une fonction d'onde est un objet assez différent des ondes classiques, la notion de phase prend un sens un peu différent dans ce cas, mais le plus important est que, de la même façon que la phase classique n'influence pas la propagation de l'onde, elle ne change quasiment rien à l'état de la fonction d'onde à laquelle on l'associe. Elle n'intervient que lors du calcul de probabilités qui fait intervenir la valeur absolue de la fonction d'onde. Elle joue un rôle important dans le phénomène d'interférences, car c'est elle qui détermine de quelle façon les deux fonctions d'ondes vont se superposer (si elles seront « alignées » ou non).

Le but de l'expérience en question est de faire interférer deux condensats de bose-einstein (état de la matière obtenu à très faible température et pour lequel se manifestent des propriétés quantiques) d'atomes de Sodium. On prépare donc deux condensats dans des « pièges » où ils sont maintenus par des champs magnétiques, puis on les relâche afin de les laisser se recouvrir spatialement. On mesure ensuite la position de chaque atome pour remonter à la figure formée par l'ensemble des condensats. C'est un peu comme si, après avoir jeté une pierre dans un lac, on mesurait la position de chaque molécule d'eau à la surface de l'eau pour reconstituer les ondes formées par les vaguelettes. Les condensats sont habituellement « lisses » lorsqu'ils sont dans leur état indéterminé (toutes les phases sont présentes et se superposent, donc le résultat final n'en présente aucune car elles se compensent statistiquement), mais si on observe effectivement une figure en « vaguelettes », c'est que le condensat a adopté une phase (et qu'il l'a adoptée aléatoirement parmi toutes celles possibles). Et c'est le cas dans l'expérience.

D'après la théorie, au fur et à mesure que les positions des atomes sont mesurées, la phase du condensat devient de mieux en mieux définie (car c'est la mesure qui la définit). Lorsque l'on effectue la première mesure, la phase a le choix entre toutes ses valeurs possibles, mais à partir de la deuxième mesure, la valeur mesurée précédemment restreint le nombre de possibilités pour la phase. Cependant, comme la mesure n'est pas vraiment effectuée atome par atome dans les faits, on ne peut pas mettre rigoureusement en évidence cet effet de progression, on peut simplement constater que la phase est différente à chaque répétition de l'expérience, d'où on en tire la conclusion que sa détermination était aléatoire.

Il existe également des expériences¹ où l'on piège un ion ou un électron dans un champ magnétique, puis on mesure en permanence l'une de ses caractéristiques, comme par exemple sa fluorescence

¹ Nagourney, W., Sandberg, J., Dehmelt, H., 1986. ; Sauter, T., Neuhauser W., Blatt, R., Toschek, P.E., 1986, ; Itano, W.M., Bergquist, J.C., Hulet, R.G., Wineland, D.J. 1987 ; etc. Mentionnés dans FL, p. 190-194.

pour le premier (émission de photons lorsque l'atome se trouve dans certains états excités) ou son énergie magnétique pour le deuxième. On observe qu'il n'y a pas de transition entre les valeurs mesurées à différents moments : la caractéristique mesurée saute directement d'une valeur à l'autre en formant des marches lorsqu'on la représente en fonction du temps. Or, l'équation de Schrödinger prévoit qu'on devrait trouver une valeur moyenne constante entre tous les états possibles pour ces caractéristiques, donc les expérimentateurs en déduisent qu'ils observent là le fait que la mesure détermine de façon instantanée et aléatoire un seul état parmi tous les états possibles.

Cependant, personne ne peut effectivement comparer les diagrammes obtenus avec ceux que l'on aurait obtenus pour la situation d'avant la mesure (puisque la mesure provoque un changement). Il n'est donc pas certain que cette expérience constitue une preuve d'une détermination aléatoire, elle pourrait simplement être une preuve d'une discrétisation des états possibles.

1.3. La décohérence

La mécanique quantique n'est pas restée inchangée depuis l'époque d'Einstein et de Bohr. Un argument dans le sens de l'interprétation indétermination est que les nouvelles évolutions de la théorie permettent une plus grande cohérence du modèle, et c'est ce qu'apporte notamment le phénomène de décohérence, qui explique le fait que l'indéterminisme ne puisse pas être observé à l'échelle macroscopique.

La cohérence quantique se définit par rapport à des critères assez précis, mais on peut dire de manière générale qu'il s'agit de la caractéristique qui contraint d'utiliser le formalisme quantique pour la description d'un phénomène. La décohérence est donc la perte de ce caractère. C'est un phénomène d'abord prévu par la théorie puis vérifié expérimentalement¹, qui tend constamment à réduire la durée de vie des superpositions cohérentes.²

À l'échelle quantique, en effet, les objets ne sont pas toujours indépendants les uns des autres : lorsqu'elles sont dans un état cohérent, les particules s'influencent entre elles à distance, c'est ce qu'on appelle l'intrication. Cet état est le plus étrange que puisse adopter un système quantique, celui où tous les états superposés produisent des interférences entre eux et sont indiscernables (on parle de superposition cohérente). Une fois la décohérence effectuée, apparaît une superposition

1 Expérience menée par Serge Haroche qui lui a valu le prix Nobel de physique en 2012.

2 FL, p. 160.

plus simple à manipuler où les états sont bien distincts et se présentent sous la forme d'un ensemble statistique, descriptible à l'aide de probabilités. L'état total du système est alors dit « mixte » et les états statistiques sont appelés « micro-états ».

L'objet mathématique qui permet de décrire cet état mixte est une matrice densité. Celle-ci est définie comme une somme de matrices dont chacune est construite en projetant la fonction d'onde d'un micro-état sur un espace matriciel et en la pondérant par la probabilité de ce micro-état. Lorsque les micro-états sont indépendants les uns des autres, cette matrice est diagonale et peut être manipulée, on peut par exemple écrire son équation d'évolution qui ressemble à celle de Schrödinger. Par contre, dans le cas d'une superposition cohérente, du fait qu'il existe des termes d'interférences entre deux micro-états, il n'est pas possible de définir la matrice densité. Il arrive également que l'on obtienne une matrice densité particulière, dont le carré est égal à elle-même. Dans ce cas, on a affaire à ce qu'on appelle un état « pur », qui n'est plus une superposition statistique mais se réduit à un seul état. Cette réduction est appelée l'objectification et c'est ce qui se produit lorsque l'on effectue une mesure.

En réalité, la mesure est constituée de deux étapes : la décohérence dans un premier temps, qui amène le système d'un état intriqué à un état mixte, et ensuite l'objectification qui amène l'état mixte à un état pur, de manière fondamentalement aléatoire, et c'est ce passage qui n'est pas encore résolu.

On peut traduire cette difficulté géométriquement : si un état mixte correspond à un ensemble convexe¹, un état pur correspond à l'un des points du bord de cet ensemble. Or, les points du bord sont précisément définis par le fait qu'il est impossible qu'ils soient compris dans aucune combinaison convexe de l'ensemble. Si on trace un disque (ensemble convexe de dimension 2), on ne pourra trouver aucune paire de points appartenant à ce disque dont la droite qui les relie croiserait le bord du disque. Il n'est donc pas possible d'arriver par construction à un point du bord, de même pour un état pur.

De manière générale, la décohérence est très rapide et lorsqu'on arrive à l'échelle de la molécule, il n'est déjà plus possible de décrire le système comme cohérent. Il existe néanmoins des exceptions, des systèmes macroscopiques parfois de très grande dimension qui restent dans une superposition cohérente, mais pour cela, il faut que le système soit parfaitement isolé de l'extérieur. Par exemple, la propagation des électrons dans une fibre optique est de ce type : une particule placée dans une

1 Ensemble sans « trou » ni « creux ». Plus rigoureusement, c'est un ensemble défini par le fait que la combinaison convexe de n'importe quel couple de points compris dans cet ensemble sera toute entière comprise dans cet ensemble. Une combinaison convexe de deux points a la forme d'une somme qui donne pour résultat l'ensemble des points de la droite (chemin le plus court) qui relie ces deux points. Un ensemble convexe est donc un ensemble où, si l'on prend deux points au hasard et que l'on relie ces points, la droite qui les relie ne traversera aucune zone qui n'appartiendrait pas à l'ensemble.

fibre optique voit sa fonction d'onde s'étendre tout le long de la fibre, sans qu'elle soit influencée par l'extérieur. Elle peut donc conserver une cohérence sur plusieurs kilomètres. Un exemple plus spectaculaire est celui de l'hélium qui, lorsqu'il descend sous le seuil d'une certaine température (environ 2 K), devient « superfluide », c'est-à-dire qu'il perd toute viscosité (il n'est plus retenu par frottement le long des parois d'un récipient par exemple). Cette superfluidité est due au fait qu'il adopte le comportement d'un système quantique cohérent (en l'occurrence, un condensat de bose-einstein).

La décohérence, par le fait qu'elle fasse en sorte que le système *doive* faire un « choix » entre les micro-états incompatibles de l'état mixte qu'elle produit, explique que tout soit déterminé à notre échelle. Cependant, elle n'a rien à voir (et c'est une confusion courante) avec la sélection aléatoire d'un des résultats possibles parmi ces micro-états, et n'est donc qu'une partie de la justification qu'il faudrait fournir au fait que l'on avance qu'il existe un indéterminisme ontologique malgré le fait que l'on observe des processus déterminés à notre échelle.

2. Éléments en défaveur d'un indéterminisme ontologique

2.1. Arguments

La plupart des physiciens qui se sont opposés au modèle indéterministe de la mécanique quantique l'ont fait parce que cette indétermination impliquait un saut conceptuel inacceptable selon eux, notamment au niveau de la perte de causalité, mais surtout du fait que cela revient à accepter une impossibilité de comprendre au moins une étape de raisonnement sur un certain type de phénomènes physiques observables. Pour ceux qui considèrent que la démarche de la science a pour but de découvrir les lois de la nature, la croyance en une indétermination ontologique est antiscientifique car opposée à la croyance en notre capacité de connaître. Par exemple, René Thom considère que le hasard est juste une limite dogmatiquement posée à notre connaissance, de la même façon que l'était l'évocation de la volonté de Dieu, et selon lui, c'est un concept entièrement négatif (qui ne peut être défini que par négation d'autre chose) et donc dénué d'intérêt scientifique¹. Sans aller jusque là, nous sommes forcés de reconnaître que l'évocation en dernier recours d'un hasard indécomposable (de même que celle d'une impossibilité de mesure des grandeurs de l'inégalité de Heisenberg)

¹ DET, p. 75.

représente une limite à la connaissance qui peut générer une certaine frustration.

Ce malaise mis à part, il y a effectivement des éléments contradictoires au sein même de la théorie. Par exemple, Heisenberg fait remarquer à Bohr en 1935 qu'il y a une antinomie épistémologique entre la non-validité des lois de la physique ordinaire dans le domaine microphysique et le fait que cette non-validité est démontrée avec des appareils construits selon les lois de cette physique ordinaire¹. Cette préoccupation relève de la question de ce que nous pouvons savoir à propos d'un monde qui dépasse les limites de celui où nous évoluons. Pour la question qui nous occupe, cela se traduit par « ce que nous pouvons savoir à propos d'un monde indéterministe en utilisant des outils déterministes ». En effet, s'il existe comme le pense Heisenberg une limite claire (définie par les lois qui y sont valides) entre le monde macroscopique et le monde microscopique ; affirmer quelque chose sur ce dernier à l'aide d'outils qui n'en font pas partie outrepasser nos capacités tout autant que tenter d'appliquer la raison pure aux antinomies décrites par Kant, et c'est pour mettre cette analogie en évidence qu'Heisenberg utilise ce terme. Si on accepte cette limite, il n'est plus possible de raisonner en termes réalistes et il faut se résoudre à appliquer toutes les précautions dictées par l'idéalisme, en d'autres termes à renoncer à considérer comme vraie toute connaissance que nous pourrions déduire à propos du monde microscopique.

Un autre problème épistémologique qu'énonce Bohm est que la théorie possède un nombre de traits arbitraires qui sont susceptibles d'une adaptation infinie aux faits, de la même façon que les épicycles ptoléméens. Il serait amusant d'en conclure que la théorie elle-même est indéterminée. Cependant, ce problème est important car une trop grande plasticité du modèle empêche la détection d'erreurs qui pousserait à en changer et à progresser vers une approche plus fidèle du réel. La seule manière de s'en rendre compte serait de mettre en évidence le fait qu'il existe des énoncés contradictoires qui se vérifient au sein même de la théorie, mais ceci ne s'est pas encore produit. Mais ce problème-ci concerne plus la question de l'adéquation entre modèle et réalité que la question de l'indéterminisme qui nous occupe.

Plus concrètement, le fait que l'indétermination soit restreinte à une échelle donnée engendre de nombreux paradoxes dont deux en particulier ne peuvent être passés sous silence.

Le premier est le très célèbre paradoxe du chat de Schrödinger, exposé dans un article d'E. Schrödinger (*Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*) en 1935.² Il est énoncé de cette façon : un chat est parqué dans une chambre d'acier en compagnie du dispositif diabolique suivant

1 FL, p. 207.

2 Traduit de l'allemand par J. D. Trummer dans : « *The present situation in quantum mechanics : a translation of schrödinger's cat paradox paper* », *Proc. Amer. Phil. Soc.* 124,323-358 (1980).

(qui doit être à l'abri de l'intervention directe du chat) : dans un compteur Geiger¹ se trouve une toute petite quantité de substance radioactive, tellement petite qu'il se peut qu'en l'espace d'une heure se désintègre l'un des atomes, ou alors, avec une égale probabilité, aucun d'entre eux. Si cela se produit, le tube du compteur² se décharge et, par l'intermédiaire d'un dispositif de relais, libère un marteau qui brise un flacon d'acide cyanhydrique. Si on laisse le système livré à lui-même durant une heure, on pourrait dire que le chat vit encore *si* aucun atome ne s'est désintégré entretemps. La première désintégration atomique l'aurait empoisonné. La fonction d'onde du système entier exprimerait ceci en comprenant dans son expression le chat vivant et le chat mort mélangés en proportions égales. Il est typique dans ce type de situations qu'une indétermination initialement restreinte au domaine atomique se retrouve changée en indétermination macroscopique, qui peut alors être *résolue* par l'observation directe. Cela nous préserve d'accepter si naïvement un modèle flou pour représenter la réalité. En soi-même cela n'incarnerait rien d'obscur ni de contradictoire. Il existe une différence entre une photographie floue et un cliché d'un amoncellement de nuages et de brouillard.

Schrödinger ajoute qu'on prétend qu'il n'y a pas de distinction à faire entre l'état d'un objet de la nature et ce que l'on sait à son propos, ou mieux, ce que l'on peut savoir à son propos si l'on essaye de l'analyser. Lorsque l'on atteint la meilleure connaissance possible de l'état d'un objet physique, alors on est supposé pouvoir considérer comme dénué de sens tout questionnement supplémentaire à propos de son « véritable état ».

Si Schrödinger utilise des expressions comme « on prétend que » (*we are told that*) et plus loin « du moins c'est ce qu'ils disent » (*so they say*), c'est qu'il se place en opposition par rapport à ce « ils », et il en exprime la raison par sa métaphore de la photographie floue évoquée plus haut : selon lui, on a assimilé à tort notre connaissance imparfaite des mécanismes (cliché flou) à une réelle indétermination (cliché de brouillard). Nous avons projeté notre méconnaissance en ontologie. C'est pourquoi nous nous rendons compte qu'il y a un problème lorsque nous tentons d'étendre cette méconnaissance ontologique à ce que nous connaissons – le chat.

Une confusion courante est de croire que le paradoxe du chat est résolu par la décohérence : ce n'est pas le cas car la décohérence implique simplement que l'on ne peut pas dire que le chat soit dans un état intermédiaire entre mort et vivant (intriqué), mais on peut toujours dire qu'il est dans une superposition statistique d'un état mort et d'un état vivant (mixte), ce qui aurait été tout aussi

1 Détecteur de radioactivité.

2 Tube métallique rempli d'un gaz à faible pression et dans l'axe duquel est tendu un mince fil conducteur. Lorsqu'un rayonnement pénètre à travers la paroi métallique dans l'espace intérieur du tube, il ionise le gaz en y arrachant des électrons, lesquels se multiplient et produisent une cascade électronique qui se transmet au reste de l'appareil par le fil conducteur central.

absurde pour Schrödinger.

Le deuxième grand paradoxe qui se présente est celui de la chaîne sans fin de von Neumann. Il apparaît lorsque l'on considère un appareil de mesure M qui effectue une mesure sur un système quantique S dont le résultat sera lisible sur un cadran, l'aiguille de celui-ci étant directement influencée par l'état de S . Initialement, le système S est décrit par l'équation de Schrödinger, qui le représente comme une superposition d'états. Lorsque l'on ajoute l'appareil de mesure M , celui-ci peut voir bouger son aiguille d'un certain angle pour un certain état du système, ou d'un autre angle pour un autre état du système. On peut donc inclure M dans une nouvelle équation de Schrödinger qui prend en compte l'état des deux systèmes ($S+M$) comme un seul, puisque l'état de M est directement corrélé à l'état de S . La position de l'aiguille se trouverait alors dans une superposition statistique d'états correspondant un à un à ceux de S . Dans ce cas, il faudrait introduire un nouvel appareil de mesure M' pour rendre compte de l'état de M en lisant la position de l'aiguille sur le cadran. Mais alors, on pourrait appliquer le raisonnement précédent à M' et se retrouver à devoir décrire le système ($M'+M+S$). Et ainsi de suite.

En pratique, on n'observe jamais de système macroscopique qui soit dans une superposition d'états de position distincts. Il doit donc y avoir un moment, une étape de la chaîne, où l'un des états prend le dessus sur les autres (c'est ce qu'on appelle la réduction de la fonction d'onde). Cependant, la mécanique quantique standard ne parvient pas à décrire où se situe exactement cette étape ni ce qui en est la cause. J. von Neumann lui-même considère que cette situation nécessite d'introduire cette étape comme un nouveau postulat de la théorie.

Ces deux paradoxes ont en commun le fait de concerner la frontière entre le monde macroscopique et le monde microscopique, qui ne sont pas soumis aux mêmes lois. Il existe plusieurs théories qui permettent de les résoudre, dont je reprendrai ici les principales.

2.2. Théories alternatives

2.2.1. Généralités sur les théories à variables « cachées »

L'une des options envisagées pour réinterpréter l'apparent indéterminisme des phénomènes quantiques (entre autres problèmes d'interprétation) est l'existence de variables dites cachées qui, elles, seraient déterminées. Cette hypothèse est la reconstitution d'une causalité sous-jacente tout

comme les mouvements des molécules gazeuses sous-tendent les phénomènes thermodynamiques, par exemple. Les atomes seraient porteurs d'une information à laquelle nous n'avons pas accès, qui varie selon un mode déterministe mais donne l'apparence d'un tirage aléatoire. Ce serait ici la variable cachée qui « choisit » l'état dans lequel le système mesuré se révélera à la mesure.

Cependant, cette hypothèse s'est vu attribuer quelques restrictions par le théorème de Bell. À partir d'un autre problème d'interprétation de la mécanique quantique appelé paradoxe EPR (Einstein-Podolski-Rosen), qui intervient lors d'une situation de particules intriquées (liées de manière à ce que la détermination de l'état de l'une influe instantanément et à distance sur l'état de l'autre), J. S. Bell démontre par une logique très simple une condition sur les types permis de variables cachées. Bien que sa démonstration ne soit pas basée sur le problème de l'indéterminisme, la condition qu'elle implique sur les variables cachées est valable également dans le cadre du problème qui nous occupe. Selon Bitbol, sa démonstration peut être interprétée de trois façons différentes :

- a) Il est impossible d'attribuer des propriétés intrinsèques aux objets physiques. (En ce sens, il n'existe pas de variables cachées du tout.)
- b) Les objets physiques ont des propriétés intrinsèques, mais ces propriétés s'influencent à distance et instantanément.
- c) Les prédictions de la mécanique quantique qui violent les inégalités de Bell sont incorrectes.

La première option consiste à renoncer au réalisme. Elle pourrait être considérée comme satisfaisante par certains, comme Heisenberg, qui maintenait que « toutes les qualités physiques d'un atome sont dérivées, il n'en a pas de propres »¹.

La troisième a été réfutée par l'expérience d'Alain Aspect sur les particules intriquées, bien que certains physiciens comme Selleri ne considèrent pas cette expérience comme déterminante et espèrent qu'elle sera un jour réfutée.

La deuxième option est celle qui a été retenue par la majorité de la communauté scientifique. Afin de conserver la propriété de non-séparabilité des particules intriquées (le fait qu'elles doivent être considérées comme un seul objet physique), toute variable cachée compatible avec les prédictions de la mécanique quantique doit être étendue sur toute une portion d'espace et influencer à la fois les deux particules intriquées ; on dit qu'elle doit être non-locale. La non-séparabilité que nous révèlent des corrélations expérimentales se traduit ontologiquement par une non-localité. Ceci semble assez cohérent, et surtout, cela conserve la possibilité d'expliquer les phénomènes de manière totalement

1 Heisenberg, Werner, 1932. Cité dans MB p. 28.

déterministe. En effet, puisque nous n'avons pas plus de précisions sur la nature de cette variable cachée, il est possible de l'imaginer déterministe ; elle pourrait par exemple être régie par une certaine fonction périodique spatialement et temporellement. Cette fonction prendrait des valeurs différentes dans certaines situations qui nous paraîssaient pourtant semblables, du fait que les mesures sont effectuées à des instants ou des endroits où la fonction n'a pas la même valeur. Mais elle pourrait également prendre la même valeur lors d'une répétition de la mesure ou d'une mesure simultanée à deux endroits, du fait de sa périodicité.

Cette hypothèse sera adaptée par Simon B. Kochen et Ernst Specker d'une façon qui pourrait convenir à une philosophie subjectiviste au sens kantien, sous la forme d'un théorème qui fait intervenir notre perception dans la description du phénomène. Le théorème de Kochen-Specker consiste à décrire les caractéristiques des particules comme co-déterminées par la variable cachée et le dispositif de mesure, ce qui revient à introduire un contextualisme. Il est à noter que, par opposition à la contextualité, où la mesure crée la caractéristique, dans le contextualisme, la mesure modifie simplement la caractéristique (de la même façon que les choses en soi passant à travers le filtre de nos catégories). Dans ce cas, l'implication de la mesure et donc de l'expérimentateur dans le réel est beaucoup moins forte, on retrouve une idée de réalité objective. Je cite Bitbol à ce sujet : « On peut voir le contextualisme comme une projection ontologique de la contextualité ou la contextualité comme l'expression opérationnaliste du contextualisme ».

Du point de vue de l'apport physique, cela explique selon lui qu'en théorie, en mesurant simultanément et au même endroit des mêmes variables A, B et C d'une part et ce même A, B' et C' d'autre part, l'on puisse obtenir des valeurs distinctes pour A. Cependant, donner un rôle prépondérant aux instruments donne lieu à certains paradoxes qui seront évoqués plus tard (D.2.2.3).

À propos du nom attribué aux théories à variables cachées, Laloë fait remarquer qu'il est plutôt paradoxal lorsque l'on considère que toutes les variables considérées sont supposées réelles alors que dans l'interprétation standard, la fonction d'onde qui n'est qu'un objet mathématique tient beaucoup plus d'une variable « cachée ».¹ Lui-même qualifie plutôt ces variables de « supplémentaires ».

1 FL p. 227-228.

2.2.2. Exemples de théories à variables supplémentaires

i) La théorie de Landé

Selon cette théorie, il n'existerait pas d'aspect ondulatoire des particules subatomiques. Ces particules seraient simplement des corpuscules qui, lorsqu'ils traverseraient des corps matériels eux-mêmes constitués d'un grand nombre de corpuscules agencés en réseau, échangeraient avec ce réseau des quanta de quantité de mouvement.

Ces quanta d'une valeur de $n \frac{h}{L}$ où L est la périodicité du réseau incarneraient la variable cachée.

Dans le cadre de cette théorie, on peut retrouver la figure de diffraction produite par les réseaux cristallins et, pour une distribution statistique des corpuscules, les résultats s'accordent avec la mécanique quantique. Elle possède un aspect contextualiste au sens où les particules ont bien des propriétés (position, impulsion) mais les réseaux de matière (donc les instruments de mesure) modifient celles-ci. Son aspect de non-localité réside dans le fait que c'est la totalité du solide qui détermine la périodicité du réseau L , et donc la valeur du quantum de quantité de mouvement.

Cette théorie est encore en chantier, elle n'a encore été développée que pour certains phénomènes quantiques, mais elle permettrait de résoudre le problème de l'indéterminisme, car les corpuscules peuvent alors être effectivement considérés comme déterminés, dépourvus de leur aspect ondulatoire.

ii) La théorie de l'onde pilote de de Broglie - Bohm

a)Présentation de la théorie

Selon cette théorie, l'onde correspondant à chaque particule serait un champ d'information qui fixerait sa trajectoire. L'onde est régie par la traditionnelle équation de Schrödinger (déterministe), et le corpuscule par la nouvelle équation de Bohm. On y associe parfois le nom de de Broglie, car D. Bohm s'est placé dans la continuation des idées de ce dernier pour construire son raisonnement.

L'aspect contextualiste de cette théorie réside dans le fait que l'appareil de mesure, immergé dans l'onde, la déforme. L'avantage de cette interprétation est que cet effet peut être clairement imaginé, alors que dans l'interprétation de Copenhague, personne ne cherche à préciser en quoi exactement la mesure affecte le phénomène. Elle possède également des aspects non-locaux car la machine entre d'une part en jeu dans son ensemble (sa forme entière influe sur l'onde) et d'autre part elle influence

la particule à distance par le biais de cette onde.¹

L'onde est ici considérée comme un objet physique réel ; c'est un champ dont les parties réelle et imaginaire de la fonction d'onde sont les composantes, de la même façon que le champ électrique possède des composantes selon les trois directions spatiales. À la différence de celui-ci, l'onde est un champ scalaire, comparable dans une certaine mesure à la température : il existe une valeur unique pour chaque point de l'espace, au lieu d'un vecteur comme c'est le cas pour les champs de vecteurs. Il est bien connu que les champs sont modifiés par l'introduction d'un élément possédant les caractéristiques correspondantes à l'action du champ, par exemple, une charge placée dans un champ magnétique le modifie (change l'orientation et la valeur des vecteurs) et un objet chaud modifie la température des points qui l'entourent. (Limite de cette analogie : le champ de température est vu ici de manière abstraite, sans tenir compte du fait qu'il peut se traduire en termes d'agitation moléculaire).

Le corpuscule est un point, toujours de dimension infinitésimale, qui suit une trajectoire continue et possède par ailleurs des propriétés objectives qui sont ses nombres quantiques. Selon les termes de Laloë, on retrouve les mêmes « ingrédients » que dans la mécanique quantique standard. La seule chose qui est modifiée ici est leur nature ontologique, et leur fonctionnement indéterminé. L'équation qui régit la trajectoire du corpuscule en fonction de son onde pilote est de la forme :

$$\frac{d}{dt}R = \frac{1}{m|\Psi(R,t)|^2} \operatorname{Re} \left[\frac{\hbar}{i} \Psi^*(R,t) \nabla \Psi(R,t) \right] = \frac{\hbar}{m} \nabla S(R,t)$$

(source : https://www.cairn.info/loading.php?FILE=EDMAT_SCPH/EDMAT_ZWIRN_2014_01/EDMAT_ZWIRN_2014_01_0211/EDMAT_ZWIRN_2014_01_art06_img001.jpg)

Où R et m sont respectivement la position et la masse du corpuscule et S est la phase de la composante complexe de la fonction d'onde Ψ . On peut la traduire ainsi : la variation au cours du temps de la position du corpuscule (soit sa vitesse) peut être exprimée soit par la partie réelle d'un terme impliquant la variation de la fonction d'onde dans l'espace (opérateur nabla) normalisée (divisée par le carré de la norme de la fonction d'onde pour que le résultat ne dépende pas de la valeur de la fonction d'onde en chaque point mais uniquement de sa variation en chaque point), soit par la variation dans l'espace de la phase de la composante complexe (nombre imaginaire) de la fonction d'onde. Quelle qu'en soit l'expression, la vitesse aura toujours une valeur réelle : la phase d'un nombre imaginaire est toujours réelle (elle peut être assimilée à un angle) et sa partie réelle également. Cette équation explicite donc l'influence de la fonction d'onde sur la trajectoire du corpuscule, mais il est à noter que la réciproque n'est pas vraie : il n'y a pas de retour d'information

1 Analyse reprise de MB p. 356-357.

ni d'influence de la part du corpuscule sur l'onde pilote.

Il est donc possible de calculer la trajectoire d'une particule dans le cadre de cette théorie (puisque la vitesse à chaque instant est un vecteur qui possède une direction). Cependant, puisque le simple fait d'introduire un appareil de mesure dans le champ qu'est l'onde pilote perturbe celui-ci et donc la trajectoire, on ne peut avoir d'information précise sur ce qu'était cette trajectoire avant la mesure. Il faut donc postuler une distribution aléatoire de probabilité de présence de la particule avant la mesure. Ce postulat ressemble à celui de l'interprétation standard, mais ses implications sont en réalité très différentes : en effet, avant la mesure, la particule possède déjà une position et une trajectoire déterminées, et tout ce que la distribution de probabilités représente est notre propre ignorance de cette position et de cette trajectoire. Cela revient à un hasard au sens classique, assimilable à celui des théories du chaos, influencé par ses conditions initiales d'une manière que nous ne pouvons pas connaître avec les ressources actuelles.

La distribution de probabilités, appelée « distribution d'équilibre quantique », est supposée radiale centrée sur le point où la mesure localise la particule, de façon à correspondre exactement à la distribution de Bohr, donc au carré de la norme de la fonction d'onde. Le fait que cette distribution soit radiale a une logique concrète, car l'influence de l'appareil de mesure a peu de chances de déporter complètement la particule par rapport à sa position initiale, et de plus grandes chances de la dévier ou de la transporter légèrement ; il y a donc une probabilité plus grande qu'elle se soit trouvée aux alentours de la position que l'on mesure plutôt qu'à plusieurs mètres, et une probabilité décroissante, au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre, qu'elle se soit trouvée entre les deux. Pour en revenir à la coïncidence de la distribution avec le carré de la norme de la fonction d'onde, cela signifie que la position du corpuscule dépend de deux manières de la fonction d'onde, à la fois dans sa valeur initiale et dans son évolution.¹ Elle est qualifiée de distribution « d'équilibre », d'autre part, car Bohm a montré que si cette coïncidence était vérifiée à un instant donné, elle le serait pour tout instant ultérieur (avant la mesure qui donne la véritable valeur de la position), c'est-à-dire que la distribution serait stable au cours du temps, et il a également montré que même si une perturbation ponctuelle incontrôlée la modifiait, elle reviendrait progressivement à cette conformation.² Cet effet préserve automatiquement les prédictions de la mécanique quantique.

Si l'on considère à présent plusieurs particules, celles-ci sont décrites ensemble par une seule fonction d'onde, qui n'est pas la simple somme de leurs fonctions d'onde individuelles mais un champ global qui prend en compte leurs interactions. Ce champ sera caractérisé dans plus de trois

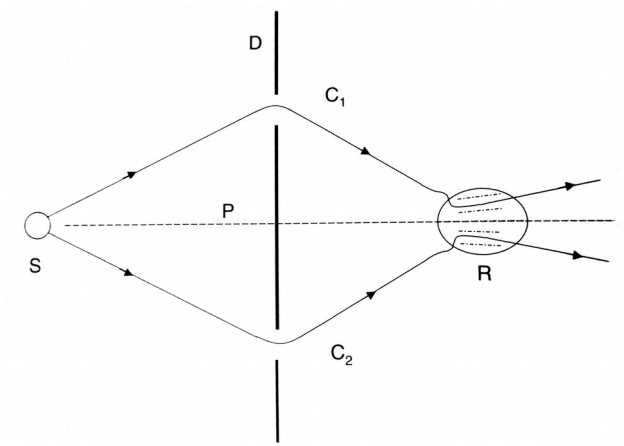
1 FL, p. 226.

2 Bohm, David, 1957. Cité dans FL, p. 227

dimensions, puisqu'il rassemblera à la fois les dimensions dans lesquelles se situent les fonctions d'ondes individuelles (trois dimensions habituelles) mais également celles dans lesquelles se trouvent leurs interactions mutuelles, qui sont des produits vectoriels des composantes des fonctions d'ondes individuelles deux à deux, et qui se situent donc dans des dimensions perpendiculaires pour chaque produit vectoriel aux deux composantes impliquées. Ainsi, pour N particules, la fonction d'onde globale devrait évoluer dans un espace à $3N$ dimensions. Il semblerait donc, puisque les ondes pilotes sont supposées réelles, que cette théorie suppose l'existence de dimensions spatiales supplémentaires. C'est donc un objet aux propriétés très particulières dont il serait sans doute nécessaire de discuter des implications ontologiques, mais cela déborde le cadre de ce travail. Chacune des particules possède par contre un corpuscule unique qui, lui, reste restreint aux trois dimensions spatiales habituelles. Notons que ce corpuscule ne possède pas d'autres propriétés propres qu'une localisation spatiale et une vitesse, les autres propriétés quantiques (spin, etc.) étant contenues dans la fonction d'onde.

On peut trouver une étude des trajectoires de ces corpuscules très complète dans le livre *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique* de Laloë, auquel je me référerai pour toutes les informations qui vont suivre en reprenant plusieurs points pour permettre une meilleure visualisation.

1. Lorsque la fonction d'onde est purement réelle et ne possède pas de partie imaginaire, la vitesse de la particule est nulle. Cela découle du fait que la phase S de la partie imaginaire est alors nulle et annule par conséquent le terme en dR/dt dans la formule de guidage. En termes de représentation, ceci implique par exemple que quand un atome d'Hydrogène est dans l'état fondamental (la fonction d'onde est alors une constante réelle), son électron ne tourne pas autour du noyau, il est immobile en un point fixe de l'espace et parfaitement à l'équilibre des forces.
2. Les trajectoires dans le vide se révèlent être non pas droites mais parfois courbes et d'une manière irrégulière. Par exemple, dans l'expérience des fentes de Young comme l'observe sur cette figure, une première courbure apparaît lorsque la particule traverse l'une des deux fentes, car son onde pilote a été diffractée par cette fente et l'entraîne donc sur une trajectoire déviée.



(source : adaptation de la figure 8.1 de FL, p. 230.)

Dans la zone « R », les deux parties de l'onde pilote qui sont passées par les deux fentes entrent en interaction et forment une figure d'interférences (représentée par des pointillés), ce qui dévie à nouveau le corpuscule. Celui-ci subit donc des revirements brusques correspondant à la transformation de son onde pilote qui, comme toute onde, subit des transformations instantanées lorsqu'elle est soumise à certaines conditions (diffraction, interférences).

3. On peut également voir sur cette figure que les trajectoires possibles du corpuscule ne traversent jamais le plan de symétrie P en pointillé, elles « rebondissent » toujours l'une sur l'autre à ce niveau, de sorte que l'on pourra déterminer lorsqu'il impactera l'écran, par quelle fente le corpuscule est réellement passé, selon qu'il arrive dans la partie supérieure ou inférieure au plan de symétrie P. Cette propriété est appelée la « règle du non-croisement ». Plus besoin de dualité onde-corpuscule donc, comme c'était le cas dans l'interprétation standard qui nécessitait d'en adopter l'existence pour expliquer que la particule passe à la fois par les deux fentes.
4. Considérons deux particules. Si la fonction d'onde qui les décrit est un produit des deux fonctions d'ondes individuelles, les deux particules sont indépendantes. Si ce n'est pas le cas et que c'en est une combinaison linéaire dont chaque terme dépend des deux fonctions individuelles, il existera une influence d'une particule sur l'autre si le corpuscule de la première entre dans la zone où se recouvrent les parties respectives des fonctions individuelles qui dépendent de sa position. C'est dans ce cas, et dans ce cas uniquement, qu'on observera le phénomène d'intrication. En effet, s'il n'y a pas de recouvrement des deux fonctions d'onde, l'une des composantes s'annule toujours et cela revient à un simple produit. La composante qui s'annule est qualifiée par Bohm d'« onde vide » du fait que la particule

n'a aucune chance de s'y trouver.

Dans ce formalisme, on constate que la non-localité apparaît de manière tout à fait évidente, beaucoup plus que dans l'interprétation standard qui reste très obscure à ce sujet (puisqu'elle est construite au départ pour être une théorie locale). Historiquement, c'est d'ailleurs par cette voie (en étudiant la non-localité de la théorie de Bohm) que Bell est parvenu à ses inégalités.

La théorie de Bohm offre, comme évoqué plus haut, une modélisation très satisfaisante du processus de la mesure. Certes, il est impossible de remonter avec précision aux conditions initiales, du fait d'une divergence par rapport à ces conditions de type chaotique (de minuscules variations font pencher le système vers un état ou un autre dans une expérience), mais cette impossibilité n'est qu'une forme d'incertitude et non d'indétermination. Et bien que le déterminisme soit rétabli, cette incertitude est suffisante pour expliquer que l'on obtienne toujours en pratique des résultats aléatoires, qui s'équilibrent statistiquement. Mais surtout, cette théorie permet de faire disparaître le caractère incompréhensible d'une mesure qui « déterminerait » une seule valeur à partir d'un état où toutes les valeurs se valent. C'est ce que Laloë qualifie de « succès considérable ! ».

b) Discussion

Une objection qui a été présentée à cette théorie sur la base d'une certaine expérience¹ était que les trajectoires des corpuscules ne pouvaient pas être réelles, mais cette objection est en réalité facilement réfutable. L'expérience consistait en un dispositif de fentes de Young à la sortie desquelles étaient placées des cavités supraconductrices au contact desquelles le corpuscule réagirait en y déposant un photon. De cette façon, il serait possible de déterminer par quelle fente était passé le corpuscule. Les résultats obtenus ont permis de constater que les cavités ne réagissaient pas de façon corrélée à l'impact perçu ensuite sur l'écran (impact qui permettait donc de repérer par quelle fente était passé le corpuscule d'après la règle du non-croisement). Une cavité pouvait réagir d'un côté du plan P alors que l'impact apparaissait de l'autre côté (finalement, on peut dire que les deux cavités réagissaient, mais qu'un seul côté de l'écran de réception était impacté). La conclusion qui en fut tirée était que la trajectoire de la particule était « surréaliste », mais il est très simple de comprendre en quoi cette conclusion était erronée. En effet, dans la théorie de Bohm, il n'y a pas qu'un seul objet qui entre dans la description : il faut également prendre en compte l'onde pilote qui est un champ réel. Or, ce champ peut lui-même interagir avec la cavité (interaction électromagnétique) et y produire un photon alors même que le corpuscule n'y est jamais passé.

1 Englert, Berthold-Georg, Scully, Marlan O., Süssmann, G., Walther, H., 1992. Cité dans FL, p 237.

Cette erreur vient seulement d'une prise en compte de la théorie de Bohm d'une façon incomplète, un peu intermédiaire avec l'interprétation standard où la fonction d'onde n'est pas réelle et ne peut effectivement pas réagir avec une cavité.

Laloë fait également remarquer que la règle du non-croisement n'est valable que pour une particule isolée, car son onde pilote rebondit sur elle-même au niveau du plan de symétrie central, mais dans le cas de cette expérience-ci, les cavités immergées dans le champ modifient celui-ci, et par conséquent la trajectoire du corpuscule, donc la description n'est plus aussi simple, ce que les auteurs de l'expérience n'ont pas pris en compte. Lorsqu'un tel phénomène se produit (phénomène d'influence des systèmes les uns sur les autres, dit d'intrication), il est nécessaire de prendre en compte dans le calcul tous les systèmes intriqués, y compris le dispositif de fentes de Young lui-même qui subit un « recul » au passage du corpuscule.

Laloë insiste ici, et tout au long de son analyse, sur la nécessité d'utiliser la théorie de Bohm de façon correcte, de la même façon que nous avons appris à éviter de telles erreurs en théorie standard, et on se rendra alors compte que finalement, les deux théories ont une structure similaire. La seule différence entre les deux théories est conceptuelle, et concerne le rapport au déterminisme, à la localité et à l'introduction par la théorie de Bohm de deux types d'éléments de réalité : ceux que l'on peut contrôler expérimentalement mais jamais observer (les ondes pilotes) et ceux que l'on peut observer mais jamais contrôler (les corpuscules).

Essayons à présent d'appliquer cette théorie à l'étude des concepts réalisée plus haut, afin de constater si elle serait susceptible de s'y adapter de manière plus satisfaisante que la théorie standard.

Si la première formulation du critère d'identité (basée sur l'absence de superposition dans le temps et l'espace) ne peut être transposée telle quelle aux objets de la théorie de Bohm, du fait de la nature spatialement superposable des ondes pilotes, il est possible d'y adapter la deuxième formulation, qui définit un objet comme identique lorsqu'il provient d'un même commencement d'existence. On pourrait objecter que les particules sont parfois produites simultanément par la même source (par exemple, la désexcitation d'un atome de plusieurs niveaux d'énergie en une fois émet plusieurs photons simultanés, et la désintégration d'une particule dite « mère » produit d'autres particules dites « filles » qui peuvent être identiques entre elles). Mais en visualisant ces processus, on s'aperçoit qu'il est toujours possible de distinguer un commencement d'existence différent pour chacune des particules.

Commençons par visualiser une désintégration sans prendre en compte les ondes pilotes, en se

représentant les corpuscules comme de petites boules molles (ce qui est une fausse image). Lorsque la particule mère est encore entière, il est évident qu'elle est elle-même. Mais au cours de la désintégration, la particule est soit « cassée » (j'entends ici une séparation instantanée) soit « divisée » (j'entends ici une séparation progressive qui commencerait par un étirement, à la manière d'une division cellulaire), il doit forcément y avoir un moment où apparaît entre les particules filles un « vide », il doit s'intercaler une tranche d'espace qui n'est plus rempli par aucune des deux « moitiés de corpuscule ». Et c'est précisément à cet instant-là que les particules filles commencent leur existence indépendante. Elles n'ont donc pas le même commencement d'existence, car elles se distinguent alors par leur position dans l'espace, et avant celui-ci, on ne peut définir d'autre objet que la particule mère.

À la suite de cette approximation, raisonnons sur l'image que la mécanique quantique donne réellement des corpuscules, c'est-à-dire sur des points dénués d'extension spatiale. Malgré cela, il est possible de discriminer pour un point de l'espace s'il est vide ou s'il est occupé par une particule. Il suffira donc de définir le commencement de l'existence indépendante des deux particules filles à partir du moment où ces points sont séparés par un unique point spatial qui ne soit occupé par aucune d'elles. Ceci est facilement imaginable si l'on se place dans un espace discret : il s'agit simplement d'un « saut » effectué par les deux particules aux points spatiaux contigus par rapport à celui où se trouvait la particule mère, ce saut étant simultané à la séparation et au commencement d'existence. Pour un espace continu, il est plus difficile de se représenter ce saut, car il est infinitésimal. Mais comme les points matériels sont eux aussi infinitésimaux, cela ne pose pas de problème conceptuel.

Revenons à présent à l'onde pilote : on sait que les deux corpuscules fils ont dès leur séparation une position différente. Or, la relation entre l'onde pilote et le corpuscule est déterminée par la position de ce dernier. Chaque corpuscule est associé à une fonction d'onde individuelle, bien que dans le cas de particules intriquées (comme c'est le cas ici), il soit également possible de combiner ces fonctions individuelles pour obtenir une fonction d'onde globale. On peut donc dire que les termes de la fonction d'onde globale qui dépendent de la position du premier corpuscule lui sont identifiés, du fait qu'ils ont le même commencement d'existence, et inversement. La fonction d'onde globale bien que parfaitement « mélangée » contient des composantes identifiables par leur dépendance à l'un ou l'autre corpuscule.

Cependant, il y a des choses auxquelles cette définition ne peut s'appliquer ; ce sont celles qui n'ont pas de commencement. Si l'on suppose que l'Univers a toujours existé, on ne pourrait pas dire qu'il soit lui-même. Néanmoins, cela ne pose pas de problème fondamental puisqu'il n'existe par

définition rien d'autre que l'Univers, il n'y a rien dont il serait besoin de le discriminer.

Il est donc possible de proposer une définition de l'identité selon le commencement d'existence temporel et spatial. Quant à la causalité, il n'est plus nécessaire d'en donner une définition qui inclue la contingence puisque la théorie de Bohm est déterministe, et ce déterminisme résout aussi la question de la bivalence.

Néanmoins, il faut bien garder à l'esprit que cette description n'est valable que dans le cadre de cette théorie, du fait que la fonction d'onde y soit considérée comme une forme un peu particulière d'onde classique, étendue dans $3N$ dimensions, certes, mais toujours d'aspect ondulatoire. Or, cette fonction est définie dans un espace qui est le produit tensoriel d'un espace de Hilbert à $3N$ dimensions (où N est le nombre de particules du système qu'elle décrit), par un espace complexe double (à quatre dimensions) qui représente le spin. L'espace de Hilbert en question, appelé espace des fonctions de carré sommable et noté $L^2(\mathbb{R}^{3N})$, permet effectivement de décrire les phénomènes ondulatoire, il a été défini dans ce but lors de sa première introduction dans le formalisme. Mais depuis l'ajout, astreint par la découverte du spin, de cet espace complexe à l'espace de Hilbert, la fonction d'onde est devenue un objet d'un tout autre ordre. Si on attribue, comme Bohm, un statut ontologique à la fonction d'onde, cela suppose que l'espace réel doit pouvoir accueillir un tel objet, ce qui n'est absolument pas évident. Quelle que soit la façon dont on envisage ce produit tensoriel, en effet, il comportera toujours une composante complexe, or l'espace complexe a été défini précisément pour pouvoir y introduire des objets tels que les nombres imaginaires qui ne peuvent exister dans notre espace réel.

Cependant, puisque Bohm a développé sa théorie vingt-cinq ans après la découverte du spin, il devait sans doute avoir connaissance de ce problème, et bien que je n'aie pas trouvé d'article à ce sujet, peut-être a-t-il envisagé une représentation de la fonction d'onde qui s'adapte à un espace réel, tout en requérant une description à l'aide de ce produit tensoriel pour être décrite complètement. Elle serait peut-être une combinaison de deux ondes correspondant chacune à l'une des valeurs du spin, et le corpuscule sauterait alors de l'une à l'autre lorsque le spin serait modifié. Une recherche plus poussée serait ici nécessaire pour s'assurer de l'incompatibilité de cet espace avec une description ondulatoire.

Une autre objection qui peut être faite à la théorie de Bohm est qu'elle ne s'accorde pas avec la théorie de la relativité (tout comme la théorie standard avant l'introduction de la théorie quantique des champs). Néanmoins, on peut se risquer à supposer qu'il ne s'agit que d'une question de temps avant que le formalisme ne parvienne à s'y adapter. D'autant plus que la théorie quantique des

champs est elle-même loin d'être parfaite et ne satisfait pas l'ensemble de la communauté scientifique non plus. Il existe des travaux consacrés à l'adaptation relativiste de la théorie de Bohm¹, en l'occurrence plutôt restrictifs sur les possibilités d'adaptation (valable seulement pour un petit ensemble de fonctions d'ondes), mais il n'est pas exclu que de nouvelles avancées surviennent dans un futur proche ou lointain (peu importe le temps nécessaire du moment que la possibilité existe).

Enfin, Bitbol fait remarquer que les prolongements ontologiques y sont présentés comme « *principiellement* dénués de répondant expérimental ». En effet, contrairement à Laloë, il ne considère pas que ce que l'on peut observer expérimentalement des corpuscules (c'est-à-dire leur trajectoire, puisque toutes les autres informations sont contenues non-localement dans la fonction d'onde) soit suffisant, que cela n'a pas vraiment de sens de parler d'un « objet de nature corpusculaire qui ne rassemble au voisinage de sa position qu'une seule détermination : cette position elle-même ». En d'autres termes, qu'est-ce qui différencie ce point matériel des autres points de l'espace ? D'autre part, il fait valoir le fait que puisque la nature et la disposition de l'instrument de mesure influencent la trajectoire en question, même celle-ci ne peut faire l'objet d'une vraie investigation expérimentale (pour laquelle il considère qu'il faudrait faire intervenir une série de configurations expérimentales distinctes), et cette critique est à mon avis légitime car en effet, la seule manière d'accéder à l'essence d'un objet physique serait de pouvoir comparer plusieurs situations dans lesquelles il intervient et en raboter tout ce qui est particulier à chaque situation pour atteindre l'élément qui se conserve, donc qu'on peut qualifier de réel, au croisement de ces points de vue différents.

L'affirmation ontologique des caractéristiques des particules bohmiennes n'est donc qu'un postulat, auquel il est demandé d'adhérer sous l'unique justification (qui n'est cependant pas des moindres, il faut le signaler) qu'elle sauve le déterminisme, mais sans avoir jamais aucun moyen de la vérifier expérimentalement.

2.2.3. La théorie de la fonction d'onde universelle d'Everett

La théorie de la fonction d'onde universelle, plus couramment (mais de façon caricaturale) qualifiée de théorie des mondes multiples, a été introduite par Hugh Everett dans sa thèse de doctorat², en 1957, pour laquelle il recherchait une alternative à l'interprétation la plus commune de la mécanique quantique.

Everett commence par mettre en évidence un paradoxe qui est une reformulation du paradoxe de la

1 K. Berndl, D. Dürr, S. Goldstein and N. Zanghì, 1996. Cité dans FL, p. 236.

2 Everett, Hugh, *The theory of the universal wave function*, 1956.

chaîne infinie de von Neumann, suffisant pour mettre en défaut l'interprétation de Copenhague. Il envisage la situation d'un observateur (qu'il nomme B) observant un système constitué d'un autre observateur (A) en train d'effectuer une mesure sur un système quantique S. Cette situation sera également reformulée quelques années plus tard par Eugene Wigner sous la forme d'une extension du paradoxe du chat de Schrödinger (B étant Wigner, A son ami et S la boîte contenant le chat), c'est pourquoi on la qualifie de « Wigner's friend story ».

Everett se demande s'il est raisonnable de considérer le système (A+S) comme ayant un comportement quantique (indéterministe) ou au contraire classique (déterministe). Si l'on choisit cette dernière possibilité, c'est-à-dire si l'on soutient qu'il est impossible de décrire le système (A+S) par une fonction d'onde obéissant à une équation d'onde, cela signifie qu'on fait une différence nette entre un système contenant un observateur (ou un appareil de mesure) et un système n'en contenant pas, ce qui requiert un critère précis de définition d'un observateur ou d'un appareil de mesure. Selon Everett, il serait impossible de formuler un tel critère de façon rigoureuse – il y reviendra par la suite.

Néanmoins, ceci ne le concerne pas encore, et il pose donc la description du système (A+S) comme quantique. Pour se représenter l'indéterminisme de ce système macroscopique, on peut imaginer par exemple que l'observateur affiche une réaction au résultat de sa mesure, et qu'avant la mesure, cette réaction, de même que le résultat, est parfaitement contingente. Notons qu'il faudrait peut-être envisager également la possibilité que le système, du fait de l'observateur, ne soit ni déterminé ni indéterminé, car si l'on considère la liberté d'action de ce dernier au lieu de l'envisager comme un objet mathématisable, il se pourrait qu'il ne soit descriptible dans aucun des deux formalismes (puisque'il pourrait à tout moment faire exploser tout le système par exemple, ou effectuer toute autre action aux conséquences macroscopiques non négligeables). Mais passons, c'est dans le cadre déterministe pour la conscience et indéterministe pour la matière qu'Everett pose le paradoxe, illustré par une expérience de pensée :

Quelque part dans l'espace se trouve une pièce isolée contenant un observateur A et une expérience S. L'observateur réalise une mesure sur le système et note le résultat dans un carnet. Puisqu'il est un « théoricien quantique orthodoxe », il estime que le résultat obtenu a été déterminé par la mesure au moment où il l'a effectuée. Cependant, à l'extérieur, un observateur B s'intéresse à l'évolution du système (A+S) et en particulier au résultat qui sera noté dans le carnet une semaine plus tard. En sachant toutes les données caractéristiques de ce système, il établit la fonction de probabilité de l'état du système pendant toute cette semaine d'attente. Tant que B n'intervient pas dans le système qu'il étudie, ce système est censé, selon l'interprétation de Copenhague, suivre une évolution

déterministe (et ce malgré que A soit en train d'y faire une mesure à caractère fondamentalement indéterministe). Au bout d'une semaine, B ouvre la porte et regarde le résultat inscrit dans le carnet. Ayant ainsi procédé à sa mesure du système qu'il avait auparavant décrit par sa fonction d'onde, il annonce avec condescendance à A que l'état du système n'a été déterminé qu'au moment de son entrée et que l'écriture dans le carnet, A et tous les souvenirs qu'il garde de la semaine passée dans cette pièce, n'avaient aucune existence objective jusqu'à cet instant. A fait alors remarquer à B qu'il n'a aucune raison de se rengorger car dans ce cas, il se peut que la situation présente n'aie aucune existence objective non plus et dépende des actions futures d'un troisième observateur extérieur. Ce paradoxe s'applique donc à tout univers contenant plus d'un observateur.

Everett propose ensuite cinq alternatives pour le résoudre :

Première alternative : considérer qu'il n'y a qu'un seul observateur au monde, qui est, pour chacun, lui-même. C'est le choix du solipsisme, qui peut être adopté en théorie, mais qui ne sera jamais appliqué en pratique (ce qu'Everett formule d'une manière amusante en disant que ce sujet ressentirait un malaise en écrivant des manuels qui décriraient le processus de la mesure, alors qu'ils ne seraient lus que par des personnes incapables d'effectuer cette mesure.)

Deuxième alternative : revenir à la proposition selon laquelle un système comportant un observateur ou un appareil de mesure doit être vu de manière classique. Mais dans ce cas, on se retrouve confronté au problème de la limite : si on construit un appareil de mesure particule par particule, à partir de quel nombre de particules sera-t-il considéré comme un appareil de mesure (non quantique) en tant que tel et plus comme un simple tas de matière (quantique) ? Et si c'est à l'observateur (animal ou humain) que revient d'être la limite, c'est rompre le principe de parallélisme psycho-physique (selon les mots de von Neumann) selon lequel la conscience du physicien doit être considérée comme émergeant de la même matière que le monde dans lequel elle se trouve. C'est là attribuer un statut spécial à notre rôle dans l'Univers, avec le risque de tendre vers une forme de spiritualisme dans lequel nous échapperions aux lois de la nature comme si nous n'en faisons pas partie, ce qui perturberait la démarche scientifique en nous aveuglant sur certaines questions.

Troisième alternative : admettre la validité de la description quantique de (A+S) mais refuser que B puisse jamais être capable d'établir l'état de ce système, et donc de dire plus tard à A que son état était indéterminé. Mais il n'y a aucun signe dans la théorie usuelle de restrictions d'établissement d'un état, de sorte que cela requerrait de nouveaux postulats ; d'autre part, que B ait précisément calculé ou pas l'état de A n'est pas la question, il suffit que le modèle lui laisse croire que cet état est

indéterminé. D'une manière générale, l'argument est artificiel car il pose dogmatiquement une impossibilité de connaissance.

Quatrième alternative : abandonner l'idée que la fonction d'onde soit une description complète du système. Cela revient à considérer que tous les aspects indéterminés ne le sont qu'en apparence du fait de notre ignorance d'autres paramètres, comme le hasard tel que défini plus haut, et qu'une description complète serait déterministe. Le paradoxe serait ici le fruit d'une description incomplète. C'est là l'interprétation des variables supplémentaires.

Cinquième alternative : poser la validité universelle de la description quantique, en abandonnant l'idée qu'une mesure soit une étape de détermination aléatoire. La mesure n'aurait plus de statut spécial par rapport aux autres processus, tous les phénomènes seraient décrits par l'équation de Schrödinger et donc par des fonctions d'ondes, et il serait possible de décrire l'univers entier avec une seule fonction d'onde.

C'est en cette dernière alternative que consiste la thèse d'Everett, qui mènera, après avoir été étoffée par une étude complète qui montre sa consistance logique, à une théorie proprement dite, qu'il appelle « théorie de la fonction d'onde universelle ».

Cette théorie est plus connue sous le nom de théorie des mondes multiples, du fait de l'interprétation un peu caricaturale qu'en a fait son directeur de thèse, Bryce DeWitt. En effet, si l'on considère que les propriétés de la fonction d'onde sont vérifiées pour l'ensemble de l'univers également, il est possible de décomposer le vecteur d'onde en le projetant sur une base de vecteurs d'état (c'est-à-dire qu'il est possible de décomposer la représentation mathématique d'ensemble de l'univers en une somme de tous les états que cet univers peut adopter de manière effective), et si cela correspond à la réalité, cela signifie que tous ces états possibles de l'univers coexistent, selon le principe de superposition. DeWitt présente donc ces états comme des mondes parallèles qui coexisteraient au nôtre, impalpables pour nous. À chaque mesure effectuée quelque part dans l'univers, chacune des possibilités pour cette mesure se réaliserait en créant un nouvel univers. DeWitt popularise cette interprétation en la nommant EWG pour Everett, John Wheeler (rapporteur d'Everett) et Niels Graham (son propre étudiant qui aurait clarifié les implications de cette théorie).

Everett et Wheeler, cependant, se refusent à utiliser cette formulation, car ces mondes parallèles de science fiction entreraient ainsi de manière caricaturale dans le grand public alors qu'il s'agissait de la traiter avec précaution, en conservant le terme d'« états relatifs » (relative states) pour en garder le sens mathématique. Wheeler qualifie la formulation de DeWitt de sur-simplifiée et Everett aurait écrit une lettre à ce dernier pour protester.

L'interprétation dite « des mondes multiples » paraît en effet beaucoup moins fantasmagorique lorsque l'on considère le raisonnement d'où elle a émergé et le formalisme dans le cadre duquel elle a été décrite (c'est-à-dire en tant que superposition d'états de la fonction d'onde décrivant tout l'univers plutôt qu'en tant que ramification d'univers parallèles). Cependant, il me semble qu'il y a lieu ici de se positionner clairement sur la fiabilité que l'on accorde aux mathématiques en tant que description du réel. Wheeler paraît réticent à trouver les conséquences physiques du concept mathématique de la fonction d'onde universelle, mais si l'on considère le raisonnement en termes concrets, à moins de considérer que les mathématiques ne nous permettent aucune prise descriptive sur le réel, on tombe effectivement sur cette description de mondes parallèles. Dans le premier cas, on peut se demander pourquoi avoir construit un modèle s'il ne peut être traduit par aucune description, et dans le deuxième cas, on tombe sur de sérieux problèmes physiques.

En effet, si l'univers entier admet effectivement des états superposés, que nous appellerons ici « mondes », le nombre de possibilités total devrait augmenter géométriquement puisque chaque état se ramifierait continuellement selon toutes les nouvelles possibilités créées par chaque mesure. La probabilité de chaque état, certes, serait de plus en plus faible puisque la somme de toutes ces probabilités devrait rester égale à un, mais quelle description physique cela représenterait-il ? Il est possible d'accepter pour une particule quantique qu'elle soit une superposition d'états pondérés par une probabilité, du fait de la nature déjà assez abstraite de la particule en tant que point matériel et fonction d'onde, mais à l'échelle macroscopique, il est plus difficile d'imaginer que l'on puisse « être à 50 % quelque chose ». Cela signifierait-il que la matière de chaque monde serait de moins en moins « consistante » ? Aurait une énergie de plus en plus faible ? On ne peut décemment pas imaginer qu'un nouveau lot de matière entier soit créé à l'émergence de chaque nouveau monde, car d'où viendrait toute l'énergie nécessaire à cette création ? Par définition, l'univers est l'ensemble de tout ce qui existe, il ne peut pas y apparaître d'énergie ou de matière nouvelles en provenance de quelque chose qui lui soit extérieur. Ainsi, cette interprétation amènerait de nouveaux mystères encore plus épais, à propos de cette perte de « consistance » ou d'énergie évoquée plus tôt.

Un autre aspect problématique de cette interprétation, du point de vue de la physique, est l'impossibilité de prédiction à propos de la fonction d'onde universelle. En effet, puisque le monde que nous connaissons n'est que l'un de ses états, il serait impossible pour nous d'en outrepasser les limites afin d'en déduire quelque chose sur un ensemble qui l'englobe. De même pour chaque physicien appartenant à l'un des mondes-états. Pas question non plus d'invoquer un observateur extérieur, puisque rien ne peut être extérieur à la fonction d'onde universelle. Il serait donc totalement impossible d'écrire l'équation de Schrödinger de celle-ci. Ceci pose un problème

important pour toute vision du monde qui ne supposerait pas l'existence d'une réalité indépendante.

Notons que l'écriture de cette thèse précède d'une quinzaine d'années les premières formalisations du processus de décohérence évoqué plus haut. Celui-ci a été utilisé par les physiciens partisans de l'interprétation de la fonction d'onde universelle pour répondre à certains problèmes physiques internes à cette théorie, comme le problème de la base préférée (choix de la base de vecteurs selon laquelle l'univers se divise). Dans les termes de la décohérence, on peut dire que l'univers entier serait dans un état mixte.

Il reste une dernière objection à cette interprétation, et non des moindres, qui est qu'elle ne peut être compatible avec la relativité restreinte, du fait qu'elle suppose que l'univers soit descriptible d'un bloc, à un temps donné. La relativité restreinte, en introduisant la notion de temps individuel, différent pour chaque objet de l'univers, s'oppose clairement à une telle description. Il existe peut-être des tentatives de reformulation relativiste, mais je n'en ai trouvé aucune.

2.2.4. L'interprétation transactionnelle

Cette interprétation a été développée par John G. Cramer dans les années 1980, et se base sur l'existence d'ondes dites avancées, c'est-à-dire d'ondes orientées dans le sens inverse du temps (de l'avenir vers le passé).

Ceci peut sembler étonnant conceptuellement, mais la possibilité d'existence de telles ondes était déjà présente dans le formalisme théorique de l'électromagnétisme classique, car elles étaient l'une des solutions possibles des équations de James C. Maxwell. Parmi ces solutions possibles, celles que l'on a retenues étaient les ondes retardées, qui progressent dans le sens du temps, car elles paraissaient plus conformes à la réalité telle que nous l'envisageons, mais il n'y avait aucune contradiction mathématique à l'existence d'ondes avancées.

De même, alors qu'en mécanique quantique non-relativiste l'équation de Schrödinger ne présente pas de telles solutions, en mécanique quantique relativiste, les équations que l'on utilise laissent cette possibilité ouverte, du fait qu'elles sont du second ordre en temps, c'est-à-dire que tous les termes contenant la variable temps sont mis au carré. De ce fait, il n'y a aucune différence dans les équations si la valeur de la variable temps est négative, elles aboutiront à la même solution que pour une valeur positive équivalente (de même valeur absolue).

Dans l'interprétation transactionnelle, les ondes réelles sont décrites par une combinaison de ces ondes avancées et d'ondes retardées. Le modèle est le suivant : l'émetteur (source) produit une onde retardée, qui avance dans l'espace dans le sens du temps jusqu'à rencontrer un obstacle (rencontre

située dans le futur par rapport à l'émission). Cet obstacle (l'absorbeur) renvoie une onde avancée, qui remonte le même trajet en sens inverse et tout en remontant dans le temps, jusqu'à revenir au moment de l'émission. Cette onde est renvoyée par l'émetteur et ainsi de suite, jusqu'à l'installation d'un régime d'ondes stationnaires (comme on en trouve dans les cordes de guitare par exemple) entre l'émetteur et l'absorbeur. Dans ce régime, les interférences entre les deux ondes sont destructives hors de l'intervalle de temps de la transaction (transmission simple d'un quantum entre l'émetteur et l'absorbeur). Cramer utilise le terme de « poignée de main » pour décrire cette interaction, poignée de main entre l'onde avancée et l'onde retardée.

Ce modèle permet de conserver le déterminisme du fait qu'il est uniquement ondulatoire (ce qui était l'hypothèse de recherche de Schrödinger) et résout notamment le paradoxe EPR. On y retrouve un élément commun avec le modèle de Bohm dans le fait qu'une onde est en quelque sorte « envoyée en reconnaissance » et que c'est la façon dont l'interaction avec les obstacles futurs la modifie ou la renvoie qui détermine son état dans le présent. Ce modèle est également très élégant mathématiquement, ce qui est son point fort. On pourrait y faire la même remarque que pour la théorie de Bohm : la fonction d'onde n'est pas une onde, elle est un objet plus complexe et inhabituel, mais puisque le type d'interaction qui existe entre les fonctions d'ondes est similaire à celui des ondes classiques (interférences), cela ne remet sans doute pas en question la description proposée. Néanmoins, il existe une autre objection plus déterminante : Cramer utilise l'hypothèse qu'un retour dans le temps est possible et cette hypothèse risque de coûter beaucoup à la physique en termes de paradoxes. Cette façon de présenter le processus n'en comporte pas, mais si la possibilité de remonter dans le temps est appliquée à l'échelle macroscopique, il en apparaîtra inévitablement, il faudrait donc déterminer avec précision une restriction d'échelle qui limiterait l'hypothèse au niveau microscopique et donner les raisons physiques de cette restriction.

Intuitivement déjà, elle semble difficile à accepter, et c'est ce qu'en dit F. Laloë :

[Ce point de vue] reste cependant relativement peu utilisé par les physiciens, probablement parce qu'il demande de renoncer à des idées intuitives comme celle du passé influençant le futur, et non l'inverse, ce que beaucoup peuvent considérer comme un prix trop élevé à payer pour mieux comprendre la mécanique quantique.

Conclusion

Ce panorama des théories alternatives permet de constater que les tentatives d'interprétation de la mécanique quantique ont été nombreuses – qui plus est, celles qui sont présentées ici ne sont que l'échantillon concernant l'indétermination parmi un nombre beaucoup plus important de théories. Toutes comportent des défauts, et notamment, aucune d'entre elles ne s'accorde avec la théorie de la relativité d'Einstein. Cependant, nous avons déjà évoqué le fait que l'interprétation standard ne s'y était adaptée que difficilement et imparfaitement, il est donc possible qu'une adaptation similaire soit en cours pour les théories alternatives et qu'elle soit simplement plus lente. Dans ce cas, les difficultés d'adaptation relativiste des théories alternatives apparaîtraient comme secondaires par rapport aux paradoxes dus aux implications ontologiques de la théorie standard.

Il semble d'autre part que la mécanique quantique standard soit ce qu'on pourrait appeler une théorie positive ; en est un indice le fait que le courant positiviste ait pris une plus grande part dans son élaboration que les autres, comme on peut le constater d'après la répartition des options philosophiques parmi les physiciens présentés au début de ce travail. Or, on peut comprendre en quoi cette approche est critiquable lorsque l'on lit les mots de Castoriadis racontant une anecdote d'Henri Atlan : « [un ivrogne] cherche sa clé sous le lampadaire, l'autre passe et demande : "Qu'est-ce que tu fais là ? – Je cherche ma clé... – Tu es sûr qu'elle est tombée sous le lampadaire ? – Pas du tout, je suis sûr qu'elle est tombée ailleurs ! – Mais alors pourquoi cherches-tu sous le lampadaire ? – Parce que c'est là qu'il y a de la lumière!"

La science positive ne traite que les phénomènes qu'elle sait, tant bien que mal, traiter, ce qui est légitime, et elle proclame qu'ils épuisent tout ce qui est, ce qui est aberrant. ».

Au vu de ce positionnement de la mécanique quantique actuelle, il est permis de se demander pourquoi les physiciens, même ceux qui se revendiquent comme réalistes, l'adoptent majoritairement. Pourquoi n'y a-t-il pas plus de théoriciens qui se revendiquent de l'interprétation transactionnelle, ou de celle de Bohm, ou de celle d'Everett, de sorte à constituer un panorama similaire à celui de la division des courants en philosophie, par exemple ?

À la décharge de l'interprétation standard, il est important de garder en mémoire l'argument selon lequel, d'une part, nos capacités de représentation sont limitées par nos sens et d'autre part, ce qui est lié, nous raisonnons depuis l'enfance selon la logique classique en premier réflexe sans être

certain qu'elle soit la bonne. Il est vrai qu'il faudrait se méfier d'une tendance à aborder les problèmes selon une logique que nous tenons de notre patrimoine culturel, à travers le langage notamment (clairement tourné vers le réalisme), et la forme sous laquelle sont recherchées les explications (on tentait autrefois de tout expliquer en termes de fluides, il est peut-être tout aussi abusif de tenter de tout décrire en termes de particules à présent). Notre habitude surtout d'avoir la possibilité de toucher et de regarder les choses qui nous environnent, conditionne notre logique. Par exemple, nous considérons la fonction d'onde comme une sorte d'onde parce que c'est ce que nous avons la possibilité de voir quotidiennement dans les lacs et les tasses de café, alors qu'en réalité, elle est très loin de cela. Nous y appliquons toujours instinctivement l'ancienne image, parce que nous n'en avons pas d'autre. Pour caricaturer cela, on peut cette fois évoquer l'histoire du colonel qui, pour expliquer la téléphonie sans fil à ses soldats, commence (en bon pédagogue) par expliquer la téléphonie simple, en leur demandant d'imaginer qu'un très long chien est couché entre leur caserne et Paris. Lorsque l'on marche sur la queue du chien d'un côté, sa tête aboie de l'autre. Il conclut ensuite : la téléphonie sans fil, c'est la même chose, mais sans le chien. Ainsi, aborder une notion totalement nouvelle en utilisant les images de la conception ancienne est souvent voué à l'échec.

Comme toute tendance spontanée, donc, la tendance à appliquer spontanément la logique « newtonienne » à tous les problèmes doit certainement être critiquée pour permettre l'objectivité scientifique. Cependant, il faut également se prévenir de la tendance inverse, qui consisterait à rejeter entièrement toute validité de cette logique, dont il semble qu'elle connaisse actuellement une sorte d'engouement, caractérisé par la conviction qu'il existe une multitude de choses que nous ne pourrions jamais comprendre. On répète tant le « *hén oîda hótí oudèn oîda* » de Socrate qu'il en est devenu un lieu commun. L'argument selon lequel la logique classique présente certains biais est tout à fait valable, mais il n'est pas suffisant pour expliquer que la mécanique quantique « de Copenhague » soit présente dans une proportion aussi écrasante dans le domaine de la recherche en mécanique quantique.

L'enseignement tient sans doute une grande part dans cette uniformité : en effet, la théorie standard n'y est présentée que de manière très technique sans discussion de ses failles dans l'extension à la réalité ni mention de l'existence d'autres interprétations. À la suite d'une approche de ce type, il est tout naturel que les étudiants partent avec un préjugé lorsqu'ils découvrent d'autres interprétations, en l'occurrence, l'impression qu'elles sont juste des essais, des tentatives mineures et marginales de reformulation, comme une espèce d'exercice. Mais dans ce cas, que dire ensuite de ceux qui ne se sont pas arrêtés au préjugé ; pourquoi n'enseignent-ils pas eux-mêmes ce qu'ils ont découvert ni

n'orientent-ils pas leurs recherches dans ce domaine pour rétablir un équilibre ?

Certes, les questions qui seraient alors à aborder ne sont pas simples, celle de l'identité par exemple est très complexe et joue un rôle fondamental dans une théorie de ce type ; je ne l'ai abordée que très superficiellement. Mais ces questions sont justement l'intérêt d'avoir développé un formalisme qui puisse nous permettre de les saisir plus en profondeur. Lorsque l'outil est développé, s'il ne sert pas à la tâche pour laquelle on a lancé, très longtemps auparavant, le processus de sa création, alors pourquoi s'être donné tout ce mal ? Cette tâche, celle de la physique, c'est la compréhension du monde, et pour pouvoir la réaliser, il faut bien distinguer ce qui, dans la recherche, est un aboutissement, de ce qui n'est qu'un outil ou une conséquence. Dans l'optique de connaître, la prévisibilité n'est qu'un outil et l'élégance mathématique, une conséquence.

Pour en revenir à ce que l'on peut tirer de ce travail, il semble que les théories qui fournissent l'alternative la moins coûteuse (au sens de ce qu'il faudrait admettre) sont les théories à variables supplémentaires. Nous avons vu que bien qu'il soit possible d'adapter une certaine vision du monde à la théorie standard (redéfinition de la cause, introduction d'une intuition mathématique), certains paradoxes persistent toujours et le prix à payer sur le plan ontologique est important. Le rejet de la conservation de l'énergie de la théorie d'Everett et celui de l'unidirectionnalité du temps de l'interprétation transactionnelle sont également tous deux difficiles à admettre, du fait qu'elles ont des répercussions sur les principes macroscopiques avec lesquels nous sommes familiers ; à l'inverse, le principe des variables supplémentaires ne comporte aucune implication macroscopique. On peut avancer avec prudence (au vu de toutes les restrictions que nous avons évoquées sur notre logique conditionnée), que l'idée en elle-même est plutôt naturelle et logique. À propos de la théorie de de Broglie-Bohm en particulier, les problèmes qu'elle pose ne semblent pas insolubles, cependant, il faudrait faire une étude plus poussée du sujet pour s'en assurer, car elle comporte certainement de nombreuses questions irrésolues. De même pour la théorie de Landé.

Nous pouvons conclure de tout cela qu'il n'y a pas de solution idéale, mais que nous sommes loin d'avoir exploité toutes les ressources disponibles pour en trouver une. Il s'agit donc de rester critique envers les deux approches (indéterministe et déterministe), jusqu'à ce qu'un jour – et ce n'est peut-être là qu'une question de temps – une idée nouvelle émerge, sur laquelle il soit possible de se reposer (tout en gardant à l'esprit qu'elle pourra toujours, bien entendu, être réfutée), en tant qu'elle sera plus proche d'une description du réel que celle que nous avons actuellement.

Index rerum

A

- Aléatoire 5, 7, 12 sv, 18, 24, 34 sv,
42, 46, 49, 56
Antinomie 39

B

- Bivalence 29 sv, 52

C

- Causalité **13, 17, 26, 28 sv, 38, 41, 52**
Cause 4 sv, 12, 25 sv, 41
Champ 9, 35, 44 sv, 49 sv
Changement de paradigme.....5, 17
Chaos 9 sv, 13, 46
Choix 13, 18, 26, 28, 35, 55, 58
Clinamen 15
Commencement d'existence.....24 sv, 50 sv
Conditions initiales 9 sv, 46, 49
Contextualisme 43
Contextualité 43
Contingence 26 sv, 29, 52
Corpuscule **20, 44 sv**

D

- Décohérence 36 sv, 58
Désintégration 16, 40, 50 sv
Déterminisme **3, 7, 9, 20, 29, 49 sv, 52 sv, 59, 66**
Déterministe **9, 18, 20, 29 sv, 33, 38 sv, 42 sv, 52, 54 sv, 62**

E

- Échelle 8, 13, 20, 23, 25 sv, 34, 36 sv, 57, 59
Émergent 14, 23, 26 sv, 30
Événement 7 sv, 12, 18, 26, 29 sv
Expérimentateur 26, 30, 36, 43

F

- Fiabilité 30 sv, 57
Finalité 13
Fonction d'onde 25, 34 sv, 38, 40 sv, 43, 45 sv, 50 sv, 53 sv

H

- Hasard **5, 7 sv, 11 sv, 20, 28, 38, 46, 56**
Humain 4, 11 sv, 18, 24, 26 sv, 55

I

- Identité **22 sv, 32 sv, 50, 52, 62**
Image 17, 20 sv, 51
Incertitude 16, 49
Indétermination **5 sv, 15 sv, 28, 32, 36, 38 sv, 49**
Indéterminisme **1 sv, 16, 19, 22, 25 sv, 32, 34, 36, 38 sv, 41 sv, 44, 54, 33, 38 sv, 54 sv, 62**
Indéterministe 11 sv
Intentionnalité 23 sv, 27 sv, 33, 46 sv, 59
Interférences 33 sv, 48, 59
Interprétation **4 sv, 16 sv, 25 sv, 29, 33, 36, 41 sv, 46, 48 sv, 53 sv, 56 sv, 60 sv**
Interprétation de Copenhague. **17, 19 sv, 25, 29, 44, 54**
Intuition 32 sv

L

- Logique 4, 15, 22, 27, 29, 42, 46, 56, 60 sv

M

- Macroscopique 8, 13, 22 sv, 36, 39 sv, 54, 57, 59
Mathématique 4, 9 sv, 17, 19, 21, 23 sv, 28, 32 sv, 43, 56 sv
Matrice densité 37
Mécanique quantique **1 sv, 5 sv, 8, 15 sv, 20 sv, 26, 28, 30 sv, 36, 38, 41 sv, 44 sv, 51, 53, 58 sv, 66**
Mesure **5, 8, 12, 15 sv, 18, 25, 30, 34 sv, 38, 41 sv, 49, 53 sv**
Métaphysique 4, 17, 22 sv
Microscopique 25, 39, 41, 59
Modèle 4, 13, 19 sv, 36, 38 sv, 55, 57 sv

O

- Objectification 37
Occurrence 7
Onde pilote 44 sv
Ondes avancées 58
Ondes retardées 58

P

Phénomène	4, 8 sv, 13, 15, 18 sv, 21, 23 sv, 27, 34 sv, 38, 41 sv, 48, 50, 56
Physique statistique	7 sv, 13
Positiviste	17 sv, 21
Prédictibilité	9 sv, 13
Probabilité	7 sv, 16, 24 sv, 31, 40, 46, 54, 57
Processus	4 sv, 9, 12 sv, 15 sv, 21 sv, 32, 49 sv, 55 sv, 58 sv
Propriétés intrinsèques	42

R

Réaliste	19 sv, 24 sv, 39, 49, 60
Réalité	4, 17, 19 sv, 24, 27, 32, 39 sv, 43, 46, 49 sv, 56, 58
Relativité	6, 20, 23, 25, 52, 58

S

Sceptique	20 sv, 24
Spin	25, 47, 52
Superfluide	38
Superposition	16, 36 sv, 41, 50, 56 sv
Système physique	7

T

Théorie	3, 6 sv, 10 sv, 17, 20 sv, 30, 32, 35 sv, 39, 41, 43 sv, 46 sv, 49 sv, 52 sv, 55 sv, 58, 66
Théorie quantique des champs.....	20, 52

V

Variable	7, 10, 21, 42 sv, 58
Vivant	12, 14 sv, 23, 28, 40
Vol de Lévy	13

Bibliographie

Bibliographie des sources primaires (ordre d'importance)

- Bitbol, Michel. *Mécanique quantique. Une introduction philosophique*, Flammarion, 1996.
- Laloë, Franck. *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?*, EDP Sciences, 2011.
- Everett, Hugh, *The theory of the universal wave function*, 1956.
- Selleri, Franco. *Le grand débat de la théorie quantique*, Paris, Flammarion, 1986.
- C. Castoriadis, *Les carrefours du labyrinthe*, Paris, Seuil, 1978 ; rééd. Coll. « Points Essais », 1998.
- Pomian, Krzysztof, dir. *La Querelle du déterminisme. Philosophie de la science d'aujourd'hui*, Paris, Gallimard, 1990 (Le Débat. Histoire-Politique-Société).
- Locke, John, *Essai sur l'entendement humain, livre II, Chapitre XXVII*, traduit par Balibar, Étienne dans *John Locke. Identité et différence. L'invention de la conscience*, Paris, Seuil, 1998.
- Castoriadis, Cornelius, *Figures du pensable (Les Carrefours du labyrinthe)*, Paris, Seuil, 1999.
- Poincaré, Henri, *Science et méthode, Livre premier*, § 4.
- Aristote, *Physique*, II, 6, 197b19-22
- Deligeorges, Stéphane, dir. *Le Monde quantique*, Le Seuil, collection Point-Science n°46, 1984.
- Trummer, J. D., « *The present situation in quantum mechanics : a translation of schrödinger's cat paradox paper* », *Proc. Amer. Phil. Soc.* 124,323-358 (1980).
- Boyer, Thomas, *La pluralité des interprétations d'une théorie scientifique : le cas de la mécanique quantique*. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Panthéon- Sorbonne - Paris I, 2011.
- Lucrèce, *De natura rerum*, livre II, v. 216.
- Kelly, Ruth et al., 2014. « Historical data reveal power-law dispersal patterns of invasive aquatic species ». In : *Ecography*, 37(6), 581-590.
- Cole, Blaine J., 1995. « Fractal time in animal behaviour: the movement activity of *Drosophila* ». In : *Animal Behaviour*, 50(5), 1317-1324
- Einstein, Albert, *La géométrie et l'expérience*, Paris, Gauthier-Villars, 1921.
- Einstein, Albert, *Albert Einstein/Max Born Briefwechsel 1916-1955*, Munich, Nymphenburger Verlagshandlung GmbH., 1969, traduction de P. Leccia, *Albert Einstein/Max Born : Correspondance 1916-1955*, Seuil, 1972, p. 98.

Bibliographie des sources secondaires (alphabétique)

(*Phys. Rev.* = *Physical Review*)

- Balibar, F., Darrigol, O., Jech B., 1989. *Albert Einstein, œuvres choisies I, quanta*, Seuil et Editions du CNRS.
- Berndl, K., Dürr, D., Goldstein, S. and Zanghì, N., 1996. « Nonlocality, Lorentz invariance, and Bohmian quantum theory », *Phys. Rev.* A53, 2062-2073.
- Bohm, D., 1957. « Proof that probability density approaches (ϕ^2) in causal interpretation of quantum theory », *Phys. Rev.* 108, 1070-1076.
- de Broglie, Louis, 1963. *Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la mécanique ondulatoire*, Paris, Gauthier-Villars.
- De Finetti, B., 1977. *Theory of probability I*, J. Wiley.
- Dirac, Paul A. M., 1930, *The principles of quantum mechanics*, Oxford University Press.
- Einstein, Albert, 1934, « Paul Ehrenfest, in memoriam ». In : *Out of my Later Years*, Thames and Hudson, Londres, 1950.
- Englert, B.G., Scully, M. O., Süssmann, G., Walther, H., 1992. « Surrealistic Bohm trajectories », *Z. Naturforschung* 47a, 1175-1186.
- George, André, dir. 1953. *Louis de Broglie : physicien et penseur*, Les savants et le monde, Paris, A. Michel.
- Heisenberg, W., 1932. « On the history of the physical interpretation of nature ». In : *Philosophical problems of quantum physics*, Oxford Press, 1979.
- Heisenberg, W., 1958. *Physics and philosophy*, Harper and brothers publishers ; Harper Perennial Modern Classics (2007).
- Itano, W.M., Bergquist, J.C., Hulet, R.G., Wineland, D.J., 1987. « Radiative decay rates in Hg^+ from observation of quantum jumps in a single ion », *Phys. Rev. Lett.* 59, 2732-2735.
- Keynes, J.M., 1929. *A treatise on probability*, Mac Millan.
- Kolmogorov, A., 1933. *Foundations of the theory of probability*, Chelsea publishing Co., 1950.
- Maxwell, James C., 1873. *Essay on Science and Free Will*.
- Nagourney, W., Sandberg, J., Dehmelt, H., 1986. « Shelved optical electron amplifier : observation of quantum jumps », *Phys. Rev. Lett.* 56, 2797-2799.
- Petersen, Aage, 1963. « The philosophy of Niels Bohr ». In *Bulletin of the atomist scientists* 19 (sept.).
- Popper, K., 1990. *Un univers de propensions*, L'éclat, 1992.
- Ramsey, R.P., 1926. « Truth and probability ». In : Ramsey, R.P. *The foundations of mathematics and other logical essays*, Harcourt-Brace, 1931.
- Reichenbach, H., 1945. *The theory of probability*, University of California Press, 1949.
- Sauter, T., Neuhauser W., Blatt, R., Toschek, P.E., 1986, « Observation of quantum jumps », *Phys. Rev. Lett.* 57, 1696-1698.
- Schrödinger, Erwin, *Science, Theory and Man*, Londres, Allen and Urwin, 1928, p. 50.
- Von Mises, R., 1931. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und ihre Anwendung*, F. Deuticke.

Bibliographie des sources en ligne (par ordre d'apparition de la thématique dans le mémoire)

Théorie du chaos :

<http://images.math.cnrs.fr/Sculptures-du-chaos.html>

<http://images.math.cnrs.fr/Le-moulin-a-eau-de-Lorenz.html>

<http://images.math.cnrs.fr/L-effet-papillon.html>

Poincaré, *Science et méthode* : https://fr.wikisource.org/wiki/Science_et_m%C3%A9thode/Livre_premier,_%C2%A7_IV

Opinions de Bell : <https://books.google.fr/books?id=qou0iiLPjyoC&printsec>

Théorie de Landé : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-3981-3_67

Théorie de Bohm : <http://asmp.fr/travaux/gpw/philosc/rapport2/3-Bricmont.pdf>

Version relativiste de la théorie de Bohm : <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9510027v1.pdf>

Thèse d'Everett : <http://www-tc.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf>

Informations sur la théorie d'Everett :

<https://books.google.fr/books?id=dowpli7i6TgC&pg>

<http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/qm-everett/>

Table des matières

ABRÉVIATIONS.....	3
INTRODUCTION.....	4
A. LE HASARD N'EST QU'UNE FORME LATENTE DE DÉTERMINISME.....	7
1. Utilisation des probabilités en physique classique.....	7
2. Les chaos déterministes.....	9
3. Parenthèse sur le hasard au sens de l'apparence d'intentionnalité.....	11
4. Le grain de sel du vivant.....	12
B. L'INDÉTERMINATION EN MÉCANIQUE QUANTIQUE OU LE HASARD PRIMORDIAL.....	15
1. Éléments d'introduction.....	15
1.1. Spécificité de l'indétermination en mécanique quantique.....	15
1.2. Éléments historiques : points de vue philosophiques des principaux fondateurs de la mécanique quantique.....	17
1.3. Qu'appellerons-nous « interprétation » ?.....	21
2. Conséquences d'un indéterminisme ontologique sur les concepts philosophiques.....	22
2.1. Indéterminisme et identité.....	22
2.2. Indéterminisme et causalité.....	26
2.3. Troisième option pour la bivalence.....	29
C. EXPLOITATION DES ARGUMENTS.....	32
1. Éléments en faveur d'une indétermination ontologique.....	32
1.1. Arguments.....	32
1.2. Expériences.....	33
1.3. La décohérence.....	36
2. Éléments en défaveur d'un indéterminisme ontologique.....	38
2.1. Arguments.....	38
2.2. Théories alternatives.....	41
2.2.1. Généralités sur les théories à variables « cachées ».....	41
2.2.2. Exemples de théories à variables supplémentaires.....	44
i) La théorie de Landé.....	44
ii) La théorie de l'onde pilote de de Broglie - Bohm.....	44
2.2.3. La théorie de la fonction d'onde universelle d'Everett.....	53
2.2.4. L'interprétation transactionnelle.....	58
CONCLUSION.....	60
INDEX RERUM.....	63
BIBLIOGRAPHIE.....	65
Bibliographie des sources primaires (ordre d'importance).....	65
Bibliographie des sources secondaires (alphabétique).....	66
Bibliographie des sources en ligne (par ordre d'apparition de la thématique dans le mémoire).....	67
TABLE DES MATIÈRES.....	68
RÉSUMÉ.....	69
ABSTRACT.....	69

Résumé

En mécanique classique, la notion de hasard recouvre l'ignorance que nous avons des causes de certains phénomènes du fait que ces causes sont trop nombreuses (physique statistique) ou trop complexes (physique des chaos). En mécanique quantique, ce hasard est remplacé par une indétermination au sens où même un être omniscient ne pourrait prédire le résultat d'une mesure : il est contingent qu'une possibilité se réalise plutôt qu'une autre, quoiqu'une certaine probabilité puisse être attribuée à chacune. Cette particularité ontologique perturbe la définition de certains concepts philosophiques comme l'identité ou la causalité à l'échelle quantique ; nous proposons une redéfinition de la seconde dans ce cadre et montrons pourquoi la première doit être abandonnée. Il en résulte également des paradoxes au niveau du passage entre les deux échelles (chat de Schrödinger et chaîne infinie de von Neumann).

Ceci vaut pour l'interprétation standard (dite « de Copenhague ») de la mécanique quantique, mais il existe des interprétations alternatives déterministes : les théories à variables supplémentaires, la théorie de la fonction d'onde universelle d'Everett et l'interprétation transactionnelle. Ces alternatives comportent toutes des aspects intéressants mais aussi leur propre lot de problèmes, notamment une inadéquation de leurs représentations avec un cadre relativiste. Cependant, ce point semble être une caractéristique de tout formalisme quantique. On peut donc tout de même avancer que l'option la plus avantageuse est celle des variables supplémentaires, déclinée selon plusieurs théories parmi lesquelles la principale est celle de de Broglie-Bohm. Son principal défaut réside dans son interprétation de la fonction d'onde en termes d'onde classique, et son avantage dans le fait qu'elle est déjà à même d'expliquer la majorité des phénomènes quantiques en termes déterministes.

Mots-clés : mécanique quantique, interprétation de Copenhague, (in)déterminisme, causalité, identité, variables cachées, théorie de de Broglie-Bohm.

Abstract

What we call "randomness" in classical mechanics is our ignorance of the causes of a certain amount of phenomena because these causes are too numerous (statistical physics) or too complex (chaos physics). This notion of randomness is replaced in quantum mechanics by an indeterminacy, meaning that even an omniscient being wouldn't be able to predict a measurement's result : the fact that an option or another will come true is contingent, even if a certain probability can be assigned to each one of it. This ontological particularity disturbs the definition process of a few philosophical concepts such as identity or causality ; we propose a new definition for the latter and show why the first must be abandoned. It also creates paradoxes at the frontier of the quantum and the classical scales (Schrödinger's cat and von Neumann's endless chain).

This is valid for the standard interpretation of quantum mechanics (called « Copenhagen interpretation ») but there are alternatives such as the hidden variables theories, Everett's universal wave function and the transactional interpretation (TIQM), which all show some points of interest but also introduce a certain amount of problems, and their representations in particular don't fit with a relativistic formalism. However this seems to be typical of any quantum formalism. We are thus allowed to claim that the most advantageous option is the one of the hidden variables, which offers a variety of theories whose most extended is the de Broglie-Bohm theory. Its main problem is its reading of the wave function as a classical wave and its advantage is its ability to explain the majority of quantum phenomena in deterministic terms already.

Keywords : quantum mechanics, Copenhagen interpretation, (in)determinism, causality, identity, hidden variables, de Broglie-Bohm theory.