

La mécanique quantique pour non-physiciens

Jean Bricmont

UCL-FYMA

Chemin du Cyclotron 2

B-1348 Louvain-la-Neuve (Belgium)

- 1 Introduction
- 2 La nature du problème
- 3 Interimède : ‘déterminisme’ et ‘réalisme’
- 4 La question des ‘variables cachées’
- 5 La non-localité
- 6 Solutions possibles
- 7 Considérations historiques

I Introduction

De toutes les théories physiques, la mécanique quantique est sans doute celle dont la formulation mathématique, même à un niveau élémentaire, est la plus compliquée et également celle qui est la plus ‘mystérieuse’, en ce sens qu’elle a suscité le plus grand nombre de commentaires étonnants. Ceux-ci donnent souvent l’impression que la mécanique quantique justifie des théories philosophiques considérées comme bizarres par la plupart des scientifiques, allant de formes radicales d’idéalisme jusqu’au mysticisme.

Heureusement, comprendre les problèmes philosophiques, ou conceptuels, posés par la mécanique quantique requiert certes de l’intérêt et de l’attention mais ne nécessite aucune connaissance mathématique particulière. Le but de cet article est d’expliquer les principaux problèmes de la mécanique quantique, et de discuter de façon critique les

commentaires qu'elle a suscité, y compris de la part d'éminents physiciens, en utilisant un minimum de formules mathématiques¹.

Il serait certes risqué d'inciter un étudiant ou une étudiante à travailler sur les « fondements de la mécanique quantique », surtout si elle ou lui ne bénéficie pas de moyens de subsistance et est obligé(e) de trouver du travail ; toutefois, on peut dire que ce domaine a fait des progrès lents mais remarquables durant les dernières décennies. Plusieurs physiciens célèbres ont consacré une partie de leur activité à ces problèmes. Ce qu'il y a de plus important que cet aspect sociologique, c'est le fait que la discussion sur les fondements n'a plus un caractère purement 'philosophique' : des énoncés précis peuvent être avancés, des propositions concrètes peuvent être testées expérimentalement, des théorèmes peuvent être démontrés, et ce sont ces aspects-là de la discussion qui seront envisagés ici.

Je commencerai par expliquer le problème tel qu'il est d'habitude posé ; ensuite, on verra que, contrairement à ce qu'ont parfois soutenu les partisans de « l'école de Copenhague » , le problème n'est pas de nature philosophique et ne peut pas être résolu en 'abandonnant' simplement le 'déterminisme' ou le 'réalisme'. Lorsque le problème dit 'des variables cachées' est abordé de façon inhabituelle, comme il le sera ici dans la section 4, on s'aperçoit que les problèmes de mécanique quantique sont tout différents de ce qu'on pense généralement. En particulier, le célèbre résultat de John Bell ne prouve pas l'impossibilité des théories de variables cachées, mais le caractère non-local de l'univers (section 5). On présentera ensuite, dans leurs grandes lignes, deux approches qui montrent qu'il n'y a aucune raison de penser que la mécanique quantique ne puisse pas être formulée d'une façon telle que tous les paradoxes 'philosophiques' disparaissent. En particulier, on présentera une théorie remontant à 1952, celle de David Bohm, qui résoud en principe, les problèmes conceptuels de la mécanique quantique et est renforcée, plutôt qu'affaiblie, par les résultats de Bell. Finalement, une brève évocation de l'histoire des idées liées à la mécanique quantique permettra de comprendre pourquoi les idées de Bell, comme celles de Bohm, ont été si longtemps incomprises, et continuent à l'être.

¹Certains résultats plus techniques seront néanmoins présentés dans les annexes ou dans les notes en bas de page.

II La nature du problème

Pour expliquer les problèmes posés par la mécanique quantique, il est utile de voir comment la physique classique décrit le monde et quels changements la mécanique quantique introduit par rapport à cette description.

En mécanique classique on considère des particules qui se déplacent selon des trajectoires. Elles ont donc à tout moment une position, et la façon dont cette position change détermine leur vitesse (et la façon dont leur vitesse change détermine leur accélération et ainsi de suite). Ces trajectoires sont entièrement déterminées par deux facteurs : d'une part les forces qui agissent entre les corps, d'autre part les « conditions initiales » du système considéré, c'est-à-dire l'état dans lequel se trouve le système au temps initial². La notion de 'force' est relativement intuitive lorsqu'on pense aux forces de contact ; par exemple si l'on pousse sur un objet ou qu'on le tord. Mais la physique classique ne peut pas se limiter à ce genre de force : elle introduit également des forces gravitationnelles, par exemple, qui agissent « à distance » (c'est-à-dire sans contact direct entre les corps), même à travers le vide, et, en principe, de façon instantanée. Le caractère peu intuitif de cette force a amené Newton à dire qu'il « ne forgeait pas d'hypothèses » concernant sa nature. Simplement, on peut la formuler de façon mathématiquement précise, l'introduire dans des équations et en déduire des conséquences, par exemple sur les mouvements des planètes ou des satellites, ou des mouvements sur terre, et ces conséquences sont en accord de façon tout à fait remarquable avec l'expérience et l'observation.

Les choses se compliquent encore lorsqu'on introduit des ondes (dont on peut avoir une certaine intuition à partir des ondes sur l'eau), surtout des ondes qui, elles aussi, se « propagent dans le vide », comme les ondes électriques ou magnétiques, ou lorsqu'on « remplace » les forces de gravitation par des contraintes géométriques, comme on le fait en relativité générale³.

²Cet état peut être soit le moment où débute une expérience ou, pour les systèmes naturels, celui où commencent nos observations. Il y a toujours un élément d'idéalisation dans cette notion, ainsi que dans celle de 'système', qui fait référence en général à un système isolé du reste de l'univers ; si l'on considère l'univers entier, la notion de temps initial renvoie assez vite au Big Bang.

³J'inclus les théories de la relativité, restreinte et générale, dans la physique classique, parce que, même si elles introduisent des bouleversements conceptuels importants par rapport à la mécanique de Newton,

Mais, même si les « forces », les « champs », les « contraintes géométriques » qui déterminent les trajectoires des corps sont mystérieuses, il n'en demeure pas moins que ce sur quoi porte la théorie, à savoir ces trajectoires, est intuitivement clair. Une fois que la notion de trajectoire et de mouvement est claire, d'autres notions peuvent être introduites et acquièrent indirectement un sens : la notion de vitesse par exemple, ou celle d'énergie (qui est une fonction, en général assez compliquée mais bien définie, des positions et des vitesses) ou encore ce qu'on appelle le moment angulaire, qui est déterminé par la façon dont le corps tourne sur lui-même. Cependant, comme l'exemple des forces agissant à distance le montre, on ne peut pas exiger d'une théorie physique qu'elle nous donne une compréhension intuitive du monde, mais simplement qu'elle en donne une description mathématique précise, qu'elle mène à nombre élevé de prédictions vérifiables et que ces prédictions soient confirmées par l'observation et l'expérience, et cela, la physique classique le fait. Du moins, tant qu'on ne s'intéresse pas à des objets trop petits, comme les atomes ou les électrons, pour l'étude desquels on introduit la mécanique quantique⁴.

En particulier, la physique classique donne une description du monde indépendante du fait que des scientifiques observent ou non ce monde, ou même que des êtres humains ou vivants existent ou non. Dans un cadre classique, on peut parfaitement penser que les planètes se déplaçaient selon leur orbite à l'époque où la Terre était peuplée de dinosaures ou avant que n'apparaisse la première cellule vivante.

La mécanique quantique est très différente de la mécanique classique, mais, pour ce qui nous intéresse, il suffit de savoir que l'on peut toujours représenter un système mathématiquement par un 'état', appelé 'fonction d'onde', qui est un objet mathématique abstrait, sans lien évident avec des quantités 'concrètes' telles que les trajectoires. Cet objet change au cours du temps de façon précise, en fonction des interactions entre les

ceux-ci sont différents des bouleversements introduits par la mécanique quantique, et les théories de la relativité s'insèrent de façon naturelle dans le cadre classique tel qu'il est décrit ici.

⁴Notons néanmoins que les premières anomalies constatées à l'intérieur de la physique classique concernaient des quantités macroscopiques telles que les chaleurs spécifiques des corps à basses températures ou le rayonnement du corps noir, qui ont mené à des modèles *ad hoc*, pré-quantiques (de Planck, Einstein, Debye,...), lesquels n'ont acquis qu'ultérieurement un statut conceptuel satisfaisant, à l'intérieur de la physique quantique.

constituants du système, selon ce qu'on appelle l'équation ou l'évolution de Schrödinger. Le lien entre cet état et l'expérience vient du fait que les quantités physiques introduites en physique classique, telles que la position, la vitesse, l'énergie, le moment angulaire, sont représentés en mécanique quantique par des quantités, elles aussi abstraites, mais qui sont liées à des dispositifs expérimentaux spécifiques. Il existe par ailleurs des règles de calcul précises qui permettent de prédire, étant donné un état et un dispositif expérimental correspondant à la position, la vitesse,..., quelle sera la fréquence avec laquelle tel ou tel résultat sera obtenu. D'autre part, l'état physique du système change de façon abrupte après l'expérience et il change en fonction du résultat obtenu à la fin de celle-ci. Cette dernière opération est appelée « réduction de la fonction d'onde » et est discutée plus en détail dans l'annexe. Ce changement est radicalement différent de la façon dont change l'état selon l'équation de Schrödinger, lorsqu'aucune mesure n'est faite sur le système.

C'est tout ce que la théorie nous dit, et tout ce qu'il faut en savoir, du moins si on veut s'intéresser aux problèmes conceptuels ou philosophiques. La question est simplement de savoir si la théorie décrite ci-dessus est satisfaisante ou non, et si elle peut ou si elle devrait être remplacée par une meilleure théorie.

Avant d'aborder ce problème, il faut souligner que la mécanique quantique, plus encore que la mécanique classique, a donné lieu à un nombre spectaculaire de prédictions surprenantes, allant des particules élémentaires aux étoiles, en passant par la chimie et la physique de l'état solide, prédictions tout aussi spectaculairement confirmées par l'expérience et l'observation. Elle est à la base de toute l'électronique moderne, c'est-à-dire de l'informatique et des télécommunications.

Certains en concluent qu'il ne faut pas se poser de questions sur les « fondements » de la mécanique quantique, ou se demander ce que cette théorie signifie puisque « elle marche ». Mais c'est évidemment l'inverse qui est vrai : si la théorie ne marchait pas très bien, il n'y aurait aucun sens à se demander pourquoi elle marche si bien. C'est l'accord spectaculaire avec l'observation et l'expérience qui implique que, si la mécanique quantique pose des problèmes conceptuels, il vaut la peine de les aborder et de tenter de les résoudre. C'est *parce que* la théorie « marche » si bien qu'on est en droit de se

demander comment cela est possible.

Finalement, en quoi la mécanique quantique pose-t-elle problème? *Prima facie*, de trois façons :

1. Cette théorie ne prédit, en général, que des fréquences d'événements. Quoi que l'on fasse, on est incapable, même en principe, étant donné un état quantique et un dispositif expérimental, de préparer le « même » système dans le « même » état de façon à obtenir toujours le même résultat à la fin de l'expérience. Cela est souvent exprimé en disant que la mécanique quantique est *complète*, c'est-à-dire qu'aucune autre variable que la fonction d'onde ne peut ou ne doit être introduite pour décrire le système.
2. Le seul sens physique qu'on peut attribuer à l'objet le plus fondamental de la théorie, à savoir l'état du système, dépend entièrement de l'expérience, ou, comme on dit souvent, de la « mesure ». La mécanique quantique fournit une méthode de calcul, remarquablement puissante, qui permet de prédire les fréquences de résultats obtenus dans certaines expériences mais rien d'autre. Par conséquent, il n'est pas aussi facile qu'en mécanique classique de penser à un monde décrit par la mécanique quantique, mais où il n'y aurait pas d'êtres humains ; pire, de penser à un monde où il n'y aurait pas ces objets très particuliers que sont les instruments dans nos laboratoires, et qui permettent de « faire des mesures ».
3. Le rôle fondamental de l'expérience ou de la mesure dans cette théorie est encore plus évident si l'on pense au fait que l'état du système change après une expérience, en fonction du résultat de celle-ci. Et ce changement est radicalement différent de la façon dont l'état du système change lorsqu'aucune 'mesure' n'est faite. Cette dernière assertion, qui n'est pas toujours admise, est justifiée dans l'annexe ci-dessous.

Comme écrit ci-dessus, ce sont les problèmes tels qu'ils se posent à *première vue*. Il y a une façon plus sophistiquée de poser ces problèmes, à laquelle on viendra dans la section IV. Mais il faut, avant cela, se débarrasser d'une série de fausses solutions, qui sont

typiquement des solutions *philosophiques* à un problème qui est en réalité un problème physique, ‘solutions’ qui sont malheureusement fort répandues.

Annexe : L’algorithme quantique et le problème de la mesure.

Par « algorithme quantique » on entend les principes suivants (en laissant de côté toutes les subtilités relatives aux spectres continus) : soit une « observable » A , représentée par un opérateur auto-adjoint agissant sur l’espace Hilbert auquel appartient la fonction d’onde Ψ ; nous pouvons écrire :

$$\Psi = \sum c_i \Psi_i \quad (2.1)$$

où les vecteurs Ψ_i sont les vecteurs propres de A , avec des valeurs propres λ_i :

$$A\Psi_i = \lambda_i\Psi_i \quad (2.2)$$

Alors Ψ détermine les coefficients c_i et les nombres $|c_i|^2$, qui satisfont à l’identité $\sum_i |c_i|^2 = 1$, sont les probabilités pour que la valeur propre λ_i soit trouvée quand la quantité correspondant à A est « mesurée ». Après la mesure, la fonction d’onde Ψ est remplacé par le Φ_i correspondant au λ_i trouvé, et le fait de passer abruptement de Ψ à Φ_i est ce qu’on appelle la *réduction de la fonction d’onde*.

Il est parfois suggéré qu’une analyse du processus de mesure, qui traiterait l’appareil de mesure de façon quantique, permettrait d’éviter cette opération de réduction, ou plutôt la ferait apparaître comme une conséquence de l’évolution temporelle de l’état du système ‘total’ constitué par le système mesuré et par l’appareil de mesure. Malheureusement, il n’en est rien.

Pour comprendre cela, considérons un système où, avant l’expérience, la particule a la fonction d’onde Ψ_1 . Notons Φ la fonction d’onde initiale de l’appareil de mesure. Avant l’interaction entre la particule et l’appareil, le système total aura la fonction d’onde $\Phi\Psi_1$. Après l’interaction, la fonction d’onde sera $\Phi_1\Psi_1$ où Φ_1 dénote une fonction d’onde indiquant que l’appareil a « mesuré » la particule et que celle-ci est dans l’état Ψ_1 . Que cette fonction d’onde soit incalculable en pratique ou change un cours du temps de façon compliquée n’a aucune importance pour le raisonnement fait ici. La seule propriété que

cette fonction d'onde doit posséder, c'est qu'elle décrive les appareils de mesure de façon suffisamment détaillée pour que des résultats de mesure différents soient perceptibles par des êtres humains, c'est-à-dire est qu'il existe une différence entre Φ_1 et une (ou des) fonction d'onde Φ_2 , indiquant que la particule est dans un autre état, mettons Ψ_2 . En effet, nous pouvons distinguer deux états macroscopiquement distincts de l'appareil de mesure (en le regardant); sinon, on n'aurait pas affaire à une mesure. Si la fonction d'onde est une description *complète* de l'état du système, elle doit au minimum rendre compte de cette distinction. Si, par ailleurs, la particule est initialement dans l'état Ψ_2 , après la mesure le système sera, de façon analogue, dans l'état $\Phi_2\Psi_2$.

Jusqu'à présent, rien de problématique : on a simplement exprimé précisément l'idée que l'appareil de mesure est un bon appareil de mesure. Le problème se pose si l'on considère une superposition $c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ comme état initial de la particule. Alors, le fait que l'évolution de Schrödinger est *linéaire et déterministe* (ce sont les seules propriétés de cette évolution qui sont utilisées) implique que le système sera nécessairement dans l'état

$$c_1\Phi_1\Psi_1 + c_2\Phi_2\Psi_2 \tag{2.3}$$

après la mesure, si du moins le système complet obéit à cette loi d'évolution. Le problème qui se pose alors est que (2.3) ne représente nullement l'état de l'appareil de mesure tel que nous le connaissons. Cet appareil est soit dans l'état Φ_1 , soit dans l'état Φ_2 , mais pas dans une superposition des deux ! Ou, si on préfère, la description *complète* de l'appareil après la mesure n'est sûrement pas une superposition, puisqu'une description plus fine (l'état 1 ou l'état 2) est obtenue simplement en regardant le résultat. On peut répondre que l'appareil de mesure n'est pas isolé, ou que la mesure se passe réellement lorsque notre cerveau interagit (visuellement) avec l'appareil, cela ne change rien à l'affaire. Les mesures ont des résultats bien définis, et le formalisme de la mécanique quantique ne rend pas compte de ce fait. Pour rendre les choses plus dramatiques, on peut coupler l'appareil à un chat, comme l'a suggéré Schrödinger, de façon à ce que Φ_1 représente un chat vivant et Φ_2 un chat mort. De nouveau, on obtient une superposition macroscopique donnée par la 'somme' d'un chat vivant et d'un chat mort, expression qui ne correspond certainement pas à la réalité et à laquelle il est difficile d'attribuer même un sens. Pour dire les choses

autrement, cet argument montre que la mécanique quantique n'est manifestement pas complète, puisque, après la mesure, on peut décrire le système de façon plus complète que ne le fait la fonction d'onde, qui est de la forme (2.3). Bell a beaucoup insisté sur la différence entre 'et' (l'état (2.3)) et 'ou' (la réalité observée) [5].

Néanmoins, ce problème a peu de conséquences pratiques : supposons que l'on décide que la fonction d'onde est réduite (en $\Phi_1\Psi_1$ ou $\Phi_2\Psi_2$) par un mécanisme intervenant durant la mesure (en violant donc l'évolution de Schrödinger). On n'a nul besoin, d'un point de vue pratique, d'être précis concernant le moment où cette réduction intervient. En effet, il se fait qu'il est en pratique impossible de faire une expérience qui permettrait de distinguer entre les différents moments où s'opère la réduction. Mais cette indistinguabilité pratique ne permet nullement d'éliminer le problème⁵.

On peut résumer le problème et disant que les trois assertions suivantes sont mutuellement incompatibles :

1. Les systèmes physiques macroscopiques sont dans des états bien définis (au moins la plupart du temps) : les chats sont vivants ou morts, les appareils de mesure indiquent des résultats non ambigus etc.
2. La fonction d'onde décrit 'complètement' tout système physique, c'est-à-dire qu'il n'y a aucune autre variable à introduire, même en principe, pour décrire un système physique, y compris un appareil de mesure.
3. La fonction évolue dans le temps d'une façon qui est linéaire et déterministe.

C'est ainsi que le « problème de la mesure » est formulé d'habitude en mécanique quantique, et, bien que ce soit un véritable problème, auquel aucune solution n'a jamais été apportée, à moins de trouver une véritable alternative à la façon de penser dominante (des exemples de telles alternatives seront discutés dans la section VI), ce n'est peut-être pas la façon la plus radicale de poser le problème (voir section IV).

⁵Voir [1] pour une discussion détaillée. Par ailleurs, Bell [5] a bien disséqué les différentes façons dont le problème est esquivé dans les manuels.

III Intermède : ‘déterminisme’ et ‘réalisme’

La première fausse solution aux problèmes de la mécanique quantique, consiste à dire qu’il suffit de renoncer au ‘déterminisme’, que cette renonciation est peut-être surprenante et psychologiquement dérangeante, mais n’a rien de tragique et que, si l’on s’y résoud, les problèmes disparaissent.

Commençons par souligner que, si c’était vrai, c’est-à-dire si les problèmes disparaissaient *vraiment*, alors évidemment cette solution serait parfaitement acceptable. Malgré la phrase souvent citée d’Einstein, « Dieu ne joue pas aux dés »⁶, le problème ne se réduit pas au fait que la théorie quantique est « indéterministe ». Néanmoins, avant d’expliquer cela, il faut expliciter ce qu’indéterministe veut dire. En particulier, il faut distinguer entre prévisibilité et déterminisme.

Il est facile d’imaginer un système parfaitement déterministe, une horloge par exemple, mais qui est imprévisible, en pratique au moins, parce qu’elle a été dérégulée et placée dans un endroit inaccessible. On peut aussi penser à ce qu’on appelle des « générateurs de nombres aléatoires » c’est-à-dire des mécanismes parfaitement déterministes qui produisent une suite de nombres ‘aléatoires’ c’est-à-dire ne possédant apparemment aucune régularité.

Le problème que posent ces exemples est que, si l’on se trouve en face d’un phénomène imprévisible, irrégulier, cela ne suffit pas pour en conclure qu’il est ‘vraiment’ aléatoire c’est-à-dire qu’aucun mécanisme caché, inconnu, ou peut-être même inconnaissable par les êtres humains, ne peut rendre compte de ce phénomène.

On peut évidemment dire : à quoi bon se demander s’il existe des mécanismes ‘cachés’ derrière les phénomènes ‘aléatoires’, si l’on admet que ceux-ci sont réellement imprévisibles en pratique. La réponse est double : d’une part toute la recherche scientifique nous a mené à découvrir des lois qui gouvernent des phénomènes qui sont, en pratique, imprévisibles,

⁶Phrase relativement malheureuse dans la mesure où elle ne reflète pas l’essentiel de ses objections à l’interprétation dominante de la mécanique quantique.

au moins à certaines échelles de temps : même le mouvement de certaines planètes n'est pas prévisible à l'échelle de millions d'années.

D'autre part, si la mécanique quantique nous avait seulement appris que certains phénomènes sont imprévisibles, alors cela ne pourrait pas être ce qui est caractéristique de sa *nouveauté*. En effet, Laplace, lorsqu'il énonce le principe de déterminisme universel⁷, ne le confond pas avec la prévisibilité, il ajoute que *nous* resterons toujours infiniment éloignés de l'intelligence de son « démon ». Laplace ne pensait certainement pas que l'on pourrait un jour prévoir, mettons, le temps qu'il fera à tel endroit, tel jour et à telle heure dans un siècle.

Néanmoins quand on lit certains commentaires sur la mécanique quantique, on ne peut s'empêcher de penser que sa nouveauté ne réside pas dans le simple fait d'avoir donné un moyen de calculer la probabilité avec laquelle certains phénomènes imprévisibles se produisent, mais d'avoir découvert des phénomènes *réellement* aléatoires, *vraiment* indéterminés, dont aucun mécanisme déterministe ne pourrait rendre compte (même dans mille ans, ou dans dix millions d'années, et même aux yeux d'une autre espèce que la nôtre, possédant une intelligence supérieure).

Soulignons à nouveau que si cet « indéterminisme intrinsèque » est ce que la mécanique quantique a découvert de radicalement nouveau, ce n'est pas en soi un problème. Mais il s'agit bien là d'une assertion radicale qui doit être argumentée. Et la simple constatation du fait que la physique *aujourd'hui* se limite à prédire les fréquences de certains phénomènes ne peut sûrement pas suffire à établir une assertion aussi radicale. On examinera plus loin les arguments qui ont été avancés en faveur de cette vue radicale⁸, mais on verra qu'ils n'atteignent nullement le but qu'ils visent.

L'autre faux problème ou fausse solution philosophique dont il faut se débarrasser,

⁷« Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux » ([44] p. 32–33).

⁸Qui sont ceux sur l'inexistence de variables cachées, discutés dans les sections 4 et 5.

avant de pouvoir aborder les véritables questions, c’est celui du *réalisme*. Le réalisme est l’idée qu’il existe un monde, indépendant de la conscience humaine ou de la connaissance que nous en avons, et que nous pouvons connaître certaines de ses propriétés par l’observation, l’expérience et le raisonnement. Contrairement à ce qui vient d’être discuté (l’indéterminisme) ce n’est pas une position radicale, ou même originale : c’est l’attitude spontanée de Monsieur tout-le-Monde, la doctrine du sens commun. C’est aussi la position de l’immense majorité des scientifiques ; en fait, de tous les scientifiques, mis à part certains parmi ceux qui commentent la mécanique quantique ou qui pensent atteindre une certaine profondeur philosophique.

L’attitude opposée au réalisme, l’idéalisme, peut se présenter sous différentes versions, et il n’est pas possible de les discuter toutes ici. Ce qui nous intéressera, c’est l’idée selon laquelle la réalité, ou sa structure, ou ses propriétés, est, en fait, le produit de notre esprit, ou de nos sensations, ou de nos représentations. Pour l’idéalisme, ce n’est pas le monde qui se révèle à nous à travers nos sens, c’est notre esprit qui projette sa structure sur le monde et, qui, d’une certaine façon, le constitue ou le « construit ».

C’est de cette forme d’idéalisme dont Einstein se moquait lorsqu’il demandait à Pais si celui-ci croyait *vraiment* que la lune n’est pas là quand personne ne la regarde ([57], p. 907). Et cette remarque n’était pas sans pertinence pour les fondements de la mécanique quantique, comme l’illustre le fait qu’il s’est trouvé au moins un physicien pour dire (sans doute par provocation) que la mécanique quantique *démontre* que la lune n’est pas là lorsque personne ne la regarde⁹.

Bien entendu, rien de ce qui précède ne concerne la lune en tant que telle. Einstein aurait pu prendre comme exemple n’importe quel objet familier ; une voiture passant dans la rue, une table dans son bureau etc. Ou encore, un instrument dans un laboratoire. Et c’est là que le problème se pose. En effet, la physique est entièrement « basée sur l’expérience ». Ce n’est pas une doctrine basée, en principe, sur des *a priori* ou des arguments d’autorité. C’est-à-dire que les seules raisons qu’on a de *croire* qu’une théorie physique est vraie, est

⁹Le philosophe David Stove cite et réfute ces propos, dû à David Mermin [49]. Les arguments utilisés ici sont semblables à ceux de Stove ([64], p99).

donné par l'ensemble des résultats expérimentaux qui la « confirment » ou la « vérifient ».

Par conséquent, le physicien est obligé d'admettre, simplement pour être cohérent avec ses propres arguments, que les appareils dans les laboratoires existent *vraiment* et indiquent *vraiment* des résultats à la fin d'une expérience, indépendamment du fait qu'on les regarde ou non. Si l'existence de ces objets-là dépendait de notre « regard », alors le monde serait totalement différent de celui que décrit la physique. Mais ce réalisme minimal s'étend naturellement aux autres objets de la vie courante, aux voitures, aux tables, . . . , et à la lune. C'est pourquoi il est incohérent de penser que la physique peut ou pourra à l'avenir démontrer que la lune n'est pas là quand personne ne la regarde. La physique *présuppose* l'existence objective de la lune (et de bien d'autres choses, à savoir les objets de la vie courante).

Evidemment, quand des physiciens proposent d'abandonner le réalisme, pour résoudre les problèmes de la mécanique quantique, ils ne pensent sans doute pas au réalisme de la vie quotidienne discuté ci-dessus, mais plutôt à la réalité ou à l'objectivité des propriétés des objets sur lesquels porte directement la théorie quantique, atomes, photons, électrons etc.

Mais alors un nouveau problème de cohérence se pose, qui est néanmoins distinct du précédent. La physique nous enseigne que les corps macroscopiques sont constitués d'atomes, de photons, d'électrons etc. Mais si ces derniers n'ont aucune réalité, aucune propriété intrinsèque, alors comment expliquer que les corps macroscopiques aient des propriétés bien définies ? On peut évidemment assister à l'émergence de certaines propriétés au niveau macroscopique à partir d'autres propriétés au niveau microscopique. L'exemple typique de ce genre de situation est résumé par l'assertion « la chaleur n'est rien d'autre que de l'agitation moléculaire » ; ou encore « la vie est en réalité un ensemble de réactions physico-chimiques ». Mais ce genre d'assertions n'est possible que par ce qu'il *existe* des choses au niveau microscopique, telles que l'agitation moléculaire ou les réactions. On ne peut pas avoir quelque chose qui émerge du néant. Donc, le physicien est obligé de supposer non seulement un réalisme élémentaire au niveau des objets familiers, mais encore la réalité de *quelque chose* au niveau microscopique. Evidemment ce qui est réel à ce niveau

peut ne pas être évident, ni intuitif, ni, peut-être, connaissable (par nous). Mais, si l'on soutient cette dernière thèse, il faut l'appuyer par des arguments, autre que les limitations actuelles de nos connaissances.

De toute façon, on ne peut éviter de discuter de ce qui est réel ou non au niveau microscopique et « éliminer le réalisme », c'est-à-dire éviter cette discussion, n'est en aucun cas une solution.

IV La question des ‘variables cachées’

Comme on l’a vu dans la section II, la mécanique quantique se limite à prédire la fréquence de certains événements. Mais de quels événements exactement ? On peut distinguer deux réponses possibles à cette question, et selon que l’on choisit une réponse ou l’autre, on tend à adopter deux attitudes radicalement différentes par rapport à la signification de la mécanique quantique et de la nature de ‘l’état’ du système tel qu’il est décrit par celle-ci. Il y a d’une part la signification *littérale* et d’autre part la signification *implicite*. La signification *littérale* dit que les fréquences ne réfèrent qu’aux fréquences des résultats des expériences accomplies dans le laboratoire. Le problème posé par cette interprétation est qu’elle ne nous permet pas de dire quoi que ce soit sur l’état du monde en dehors du laboratoire. En particulier, c’est une extrapolation arbitraire que de déclarer, par exemple, que la fonction d’onde (ou, pour être précis, la carré de sa valeur absolue) nous donne la probabilité de la position de la particule. C’est plutôt, si on adhère à l’interprétation *littérale*, la probabilité de *trouver* la particule, une fois qu’une mesure convenable est faite. Avant la mesure, la particule n’est ni ici ni là. Notons que le problème ne provient pas du fait que l’électron puisse avoir une infime probabilité d’être mettons *derrière* la lune, mais plutôt qu’il n’a aucune probabilité d’être où que ce soit.

Naturellement, le même argument s’applique à toutes les autres propriétés, telles que l’énergie, la vitesse, le moment angulaire etc...¹⁰. Les particules ont des propriétés génériques (telles que la masse ou le ‘spin’), mais n’ont aucune propriété individuelle, telles que celles mentionnées ci-dessus. On peut naturellement assigner une fonction d’onde à un objet situé hors du laboratoire, mais cette fonction d’onde ne représente nullement l’état du système, seulement les probabilités de ce qui arriverait si l’objet était amené dans un laboratoire et mis en interaction avec un appareil s’y trouvant. On ne peut même pas dire que les propriétés de la particule sont « affectées » par les mesures. On devrait plutôt dire qu’elles sont « créées » par elles ou que la particule et l’appareil de mesure forment un « tout inséparable ». Si on suit l’interprétation littérale, parler même de particules ou

¹⁰Excepté dans les cas particuliers où la fonction d’onde est un état propre de l’une des observables on pourrait alors soutenir que, la probabilité de trouver la valeur propre correspondante étant égale à un, le système « avait » réellement cette valeur avant qu’il ne soit mesuré.

de systèmes microscopiques est un abus de langage. La théorie parle seulement du comportement prévisible de certains objets macroscopiques particuliers appelés appareils de mesure¹¹. Appliquée à l'évolution, cette interprétation conduit à des vues particulièrement étranges : l'évolution fonctionne grâce à des mutations impliquant des processus biochimiques qui sont en fin de compte gouvernés par la mécanique quantique. Mais toute description détaillée de ces phénomènes n'aurait de sens que par rapport à des mesures (imaginaires) qui seraient accomplies dans des laboratoires, aujourd'hui.

Le lecteur peut penser que ce qui précède n'est pas ce que l'interprétation standard de la mécanique quantique dit réellement. C'est sans doute, parce qu'il ou elle a en tête l'autre conception, celle qui est 'implicite', à savoir que la « mesure » signifie réellement une mesure, c'est-à-dire que les expériences *révèlent* plutôt qu'elles ne créent les propriétés existantes du système¹². Suivant cette conception, les particules *ont des propriétés* telles que la position, le moment, le moment angulaire et, quand nous mesurons une observable A , nous *découvrons* simplement la valeur que le système a assigné à cette observable indépendamment de toute mesure.

Si l'on suit cette interprétation, les probabilités en mécanique quantique ont un statut conceptuel semblable à celui qu'elles ont dans la physique classique : les particules ont des propriétés telles que la position, la vitesse ou l'énergie, mais celles-ci nous sont inconnues ; c'est pourquoi nous faisons usage des probabilités pour décrire cette situation. L'unique trait original¹³, comparé aux probabilités classiques, est que ces propriétés sont inconnais-

¹¹Si l'on suit cette interprétation, la mécanique quantique se rapproche une conception qui est populaire chez certains philosophes et sociologues des sciences : à savoir que la science est vraie et objective, mais seulement quand ses affirmations se réfèrent à ce qui arrive à l'intérieur du laboratoire. D'après cette conception, les déclarations des hommes de science ne sont pas supposées se référer au monde extérieur ; en particulier ils ne devraient pas parler de « lois de la nature ». Les scientifiques ne devraient pas taxer de telles conceptions de « non-sens », du moins quand la discussion porte sur la mécanique quantique, à moins qu'ils n'aient une alternative claire à leurs propres discours sur le caractère central des 'mesures'. Néanmoins, on pourrait demander à celui qui partage ces conceptions, pourquoi construire des laboratoires, si les expériences qui s'y accomplissent ne nous permettent pas de connaître quoi que ce soit sur le monde ?

¹²J'appelle « implicite » cette conception, parce que je crois que c'est ce que de nombreux physiciens pensent que la mécanique quantique signifie. Bien que ce ne soit ni ce que la formulation usuelle dit ni, comme nous le verrons, logiquement cohérent.

¹³Mis à part le fait que l'équation de Schrödinger régit l'évolution de la fonction d'onde plutôt que celle

sables, même en principe (ou, du moins, nous ne pouvons en connaître que quelques-unes simultanément)¹⁴.

La conception implicite est probablement celle qui se cache derrière les formules familières telles que « la fonction d'onde ne représente pas le système mais la connaissance que nous en avons » ou encore, « la mécanique quantique ne parle pas de la nature, mais de la connaissance que nous en avons ». Suivant cette ligne de pensée, la réduction de la fonction d'onde ne pose pas de problème particulier. Quand nous mesurons un système, nous apprenons quelque chose à son sujet, ainsi notre connaissance (c'est-à-dire la fonction d'onde) change.

On peut penser que la plupart des physiciens qui ne se préoccupent pas des fondements de la mécanique quantique adoptent souvent cette vue implicite ; cependant, une analyse historique détaillée serait nécessaire pour évaluer cette conjecture.

Si la conception ci-dessus était défendable, il y aurait effectivement moins de raisons de s'inquiéter (il est d'ailleurs curieux de voir que des physiciens présentent parfois cette interprétation-là comme dramatique, alors qu'elle l'est bien moins que l'interprétation littérale). Malheureusement, il existe des théorèmes qui empêchent d'accepter cette conclusion optimiste. Ces théorèmes montrent que, si l'on suppose que certains ensembles de quantités physiques mesurables prennent des valeurs données *avant* qu'on ne les 'mesure', et si la mesure révèle simplement ces valeurs, alors on arrive à des contradictions ; c'est-à-dire qu'on peut démontrer, en supposant seulement que ces quantités préexistent à leur mesure, ainsi que certaines données expérimentales, que $+1 = -1$.

Malheureusement ces théorèmes sont relativement peu connus ou mal compris, ce qui fait que l'interprétation implicite et optimiste mentionnée ci-dessus est plus répandue qu'elle ne devrait l'être. Une des raisons pour lesquelles ces théorèmes sont peu connus vient sans doute du fait que ceux-ci ont aussi des conséquences concernant la non-localité

de la probabilité ; cela est vrai (et est souvent souligné) mais ne change rien à la présente discussion.

¹⁴Parce que « mesurer » une propriété change la fonction d'onde et dès lors change les propriétés qui sont associées aux opérateurs qui ne commutent pas avec l'opérateur correspondant à la propriété mesurée.

de l’univers, mais qui posent un problème distinct de celui abordé ici, et qui sera discuté dans la section suivante. Néanmoins, mettant de côté ici la question de la non-localité, les théorèmes sur les variables cachées nous forcent à admettre que, au moins dans certains cas, la mesure ‘crée’ le résultat, c’est-à-dire qu’il est impossible logiquement de supposer que tous les résultats observés préexistent à leur observation. Sommes-nous alors condamnés à nous rabattre sur l’interprétation littérale, et à nous résigner à son caractère paradoxal? Pas nécessairement, comme on le verra dans la section VI.

À cause de la non-existence de ces valeurs préexistantes aux mesures, on dit parfois que celles-ci sont *contextuelles*, c’est-à-dire qu’elles ne révèlent pas des propriétés préexistantes du système, mais, en quelque sorte, les produisent; le mot ‘contextuel’ dénote le fait que le résultat peut dépendre non seulement du système microscopique et de la quantité physique qui est « mesurée », mais aussi du ‘contexte’, c’est-à-dire de propriétés du « processus de mesure » autres que celles introduites dans le formalisme quantique. En fait, il vaudrait mieux de ne pas parler du tout de « mesures », parce le mot suggère qu’une propriété intrinsèque du système est en train d’être « observée »¹⁵.

Il faut souligner que nous avons à faire ici à de la « métaphysique expérimentale », pour utiliser une expression due à A. Shimony, ce qui veut dire que nous ne nous posons pas la question de savoir si ces valeurs préexistantes aux mesures peuvent être prédites (ou contrôlées, ou reproduites) par de simples êtres humains, mais s’il est *logiquement consistant* de supposer qu’elles existent. Il se fait que ce n’est pas le cas, et que ce résultat peut être obtenu uniquement en utilisant des données expérimentales bien établies.

Ce genre de résultat négatif est souvent appelé « théorème sur l’impossibilité des variables cachées ». Pourquoi? À cause de ce que Bell appelle une « sottise historique » ([7], p. 163, voir aussi la note 24, p. 92). Par définition, on appelle « variable cachée » tout ce qui ne fait pas partie de l’état quantique, ou toute variable qu’il serait nécessaire d’ajouter à cet état quantique si l’on veut arriver à une description complète du système. Le mot est « sot » parce que, comme discuté dans l’annexe de la section II, les chats vivants ou morts ou les résultats d’appareils de mesure sont des ‘variables cachées’, en

¹⁵Voir Bell [5], pour une discussion plus détaillée.

ce sens qu'il ne font pas partie de la description du monde limitée à la fonction d'onde, si du moins celle-ci obéit à l'évolution de Schrödinger. Bien sûr, ces choses-là ne sont nullement cachées (c'est plutôt la fonction d'onde qui l'est, puisque'elle doit être inférée à partir de nos observations). Bell a inventé le mot « étrable » (« beable ») pour désigner ce qui existe vraiment, indépendamment de toute mesure ou toute observation (voir [7], chap. 19). Ce que les théorèmes sur les variables cachées montrent, c'est simplement qu'il ne peut y avoir d'étrables correspondant à toutes les quantités physiques (ou même à certaines classes de telles quantités)¹⁶.

Annexe : Théorème sur l'impossibilité des variables cachées

Il existe plusieurs versions de ces théorèmes ; une d'entre elles sera discutée ici et une autre, similaire, mais directement applicable au problème de la non-localité, sera abordée dans la section suivante¹⁷. Soit \mathcal{A} l'ensemble des opérateurs auto-adjoints sur un espace Hilbert (qui peut être pris de dimension quatre ou plus).

Théorème 1 *Il n'existe pas de fonction v :*

$$v : \mathcal{A} \rightarrow \mathbf{R} \tag{4.1}$$

telle que

1)

$$\forall A \in \mathcal{A}, v(A) \in \{\text{valeurs propres de } A\} \tag{4.2}$$

2)

$$\forall A, B \in \mathcal{A}, \text{ avec } [A, B] = 0, v(AB) = v(A)v(B). \tag{4.3}$$

Remarque

¹⁶Ce simple fait rend l'approche aux fondements de la mécanique quantique basée sur les « histoires décohérentes » incohérente ou, du moins, incomplète. Voir Goldstein [36] pour une discussion plus détaillée.

¹⁷Voir Mermin [53] pour une discussion de ces théorèmes et du lien qu'il y a entre eux. Cependant, l'interprétation que donne Mermin de leur signification est, du moins en ce qui concerne la localité, différente de la mienne. J'ai appris ces théorèmes et leurs démonstrations, dans la forme spécifique que je donne ci-dessous, de Shelley Goldstein (communications privées).

Le symbole v est utilisé pour « valeur »; on devrait penser à $v(A)$ comme étant la valeur que le système assigne à l'« observable » A *avant la mesure* (et que cette dernière révèle). Les contraintes 1) et 2) sont justifiées par des raisons purement *empiriques*, entièrement indépendantes de la validité de la théorie quantique en tant que telle. En fait (pour 1) les résultats des mesures sont toujours des valeurs propres; et (pour 2), puisque A et B commutent, on pourrait (en principe) mesurer simultanément A , B et AB et les résultats doivent satisfaire (4.3).

Démonstration

Nous utiliserons les opérateurs donnés par les matrices standards « x » et « y » de Pauli, pour deux « spins », $\sigma_x^i, \sigma_y^i, i = 1, 2$ où les produits tensoriels sont compris tacitement : $\sigma_x^1 \equiv \sigma_x^1 \otimes \mathbf{1}, \sigma_x^2 \equiv \mathbf{1} \otimes \sigma_x^2$, etc. Ces opérateurs agissent sur \mathbf{C}^4 . Les identités suivantes sont bien connues :

i)

$$(\sigma_x^i)^2 = (\sigma_y^i)^2 = \mathbf{1} \quad (4.4)$$

pour $i = 1, 2$.

ii)

$$\sigma_x^i \sigma_y^i = -\sigma_y^i \sigma_x^i \quad (4.5)$$

pour $i = 1, 2$.

iii)

$$[\sigma_\alpha^1, \sigma_\beta^2] = \mathbf{0}, \quad (4.6)$$

où $\alpha, \beta = x$ ou y .

Maintenant considérons l'identité :

$$\sigma_x^1 \sigma_y^2 \sigma_y^1 \sigma_x^2 \sigma_x^1 \sigma_x^2 \sigma_y^1 \sigma_y^2 = -\mathbf{1} \quad (4.7)$$

qui suit, en utilisant d'abord ii) et iii) ci-dessus pour déplacer σ_x^1 dans le produit de la première place (en partant de la gauche) vers la quatrième place, déplacement qui consiste en une anticommutation et deux commutations :

$$\sigma_x^1 \sigma_y^2 \sigma_y^1 \sigma_x^2 \sigma_x^1 \sigma_x^2 \sigma_y^1 \sigma_y^2 = -\sigma_y^2 \sigma_y^1 \sigma_x^2 \sigma_x^1 \sigma_x^2 \sigma_x^1 \sigma_y^1 \sigma_y^2 \quad (4.8)$$

et ensuite en usant i) de façon répétée, pour voir que le membre de droite de (4.8) égal -1 .

Définissons maintenant les opérateurs suivants :

$$A = \sigma_x^1 \sigma_y^2$$

$$B = \sigma_y^1 \sigma_x^2$$

$$C = \sigma_x^1 \sigma_x^2$$

$$D = \sigma_y^1 \sigma_y^2$$

$$X = A.B$$

$$Y = C.D$$

Alors, observons ce qui suit, en utilisant ii) et iii) :

$$\alpha) [A, B] = 0$$

$$\beta) [C, D] = 0$$

$$\gamma) [X, Y] = 0$$

L'identité (7) peut être réécrite comme suit :

$$X.Y = -1. \quad (4.9)$$

Mais, en utilisant la formule (4.3) du Théorème, $\alpha) - \gamma)$ et (4.6) ci-dessus, nous avons :

$$a) v(X.Y) = v(X)v(Y) = v(A.B)v(C.D)$$

$$b) v(A.B) = v(A)v(B)$$

$$c) v(C.D) = v(C)v(D)$$

$$d) v(A) = v(\sigma_x^1)v(\sigma_y^2)$$

$$e) v(B) = v(\sigma_y^1)v(\sigma_x^2)$$

$$f) v(C) = v(\sigma_x^1)v(\sigma_x^2)$$

$$g) v(D) = v(\sigma_y^1)v(\sigma_y^2)$$

Puisque l'unique valeur propre de l'opérateur -1 est -1 , nous avons, en combinant (4.9) avec la formule (4.2) dans le Théorème et a)-g) ci-dessus :

$$v(X.Y) = -1 = v(\sigma_x^1)v(\sigma_y^2)v(\sigma_y^1)v(\sigma_x^2)v(\sigma_x^1)v(\sigma_x^2)v(\sigma_y^1)v(\sigma_y^2) \quad (4.10)$$

où le membre de droite vaut $v(\sigma_x^1)^2 v(\sigma_y^2)^2 v(\sigma_y^1)^2 v(\sigma_x^2)^2$, puisque les facteurs dans le produit apparaissent deux fois. Mais cette dernière expression est manifestement positive (et, en

fait, égale à $+1$), ce qui est une contradiction.

V La non-localité

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) ont mis le doigt sur l'aspect conceptuellement le plus révolutionnaire de la mécanique quantique. Malheureusement, cet aspect a été généralement incompris à l'époque, et n'est devenu clair qu'avec le travail de Bell en 1964. Ce que EPR ont inventé, c'est une situation où l'introduction de variables cachées leur semblait inévitable, à moins d'admettre qu'il existe des « actions à distance » c'est-à-dire qu'il soit possible, dans certaines circonstances bien précises, d'influencer *instantanément* l'état physique de certains corps à *des distances aussi grandes qu'on veut*. Et ce que Bell a montré, c'est que, contrairement à ce qu'espéraient EPR, l'introduction de ces variables cachées est impossible (pour des raisons similaires à celles discutées plus haut) et, donc, que ces actions à distance existent réellement.

Comme cette conclusion est évidemment choquante, ce résultat a donné lieu à de nombreux malentendus. Il faut par conséquent examiner l'argument de Bell en détail.

1. L'argument de Bell

Commençons par une expérience de pensée¹⁸. Considérons deux personnes, appelons-les X et Y, qui quittent une pièce par des portes opposées ; à ce moment, on pose à chacune une question. La nature exacte de la question n'importe pas, mais il y a trois questions possibles (disons, A, B et C). Chacune des deux personnes doit répondre oui ou non. Cette « expérience » est répétée un grand nombre de fois, avec des questions (et des réponses) qui peuvent varier d'une fois à l'autre, de façon à ce que toutes les paires de questions possibles soient posées aussi souvent qu'on le désire. Avant de quitter la pièce, les deux personnes peuvent se mettre d'accord pour suivre n'importe quelle stratégie, mais elles ne peuvent pas communiquer l'une avec l'autre une fois qu'elles ont entendu les questions.

La statistique des réponses présente quelques propriétés étranges. Premièrement, lorsqu'on pose la même question aux deux personnes, elles donnent toujours la même réponse. Est-ce en soi mystérieux ? Certainement pas ; elles peuvent tout simplement décider, avant de quitter la pièce, de suivre une stratégie donnée : par exemple, de dire l'une et l'autre

¹⁸Cette version de l'argument de Bell est dû à Maudlin [45].

‘oui’ si la question est A, ‘non’ si la question est B et ‘non’ si la question est C. Il y a en tout $8 = 2^3$ stratégies différentes de cette sorte. Avant de continuer, le lecteur ou la lectrice doit se demander s’il existe une autre possibilité. Existe-t-il une quelconque façon de rendre compte des corrélations parfaites entre les réponses données par les personnes se trouvant près des deux portes, éloignées l’une de l’autre, et ne communiquant pas entre elles, sans supposer que les réponses sont prédéterminées ? Je n’ai jamais vu suggérer d’autres possibilités et je pense que, si l’on peut dire que le théorème de Bell est le résultat le plus mal compris de l’histoire de la physique, c’est précisément parce qu’en général, on ne cherche pas à répondre *d’abord* à cette question.

Acceptons donc l’idée selon laquelle les réponses sont prédéterminées et appelons ces réponses : $v(\alpha) = \text{oui/non}$, $\alpha = A, B, C$. C’est ce qu’on peut appeler la partie ‘EPR’ de l’argument : Bell est parti de cette idée et ne l’a pas inventée, puisqu’elle remonte à l’article de 1935. Ces variables sont des « variables aléatoires » ; c’est-à-dire qu’elles peuvent prendre différentes valeurs quand on répète l’expérience. On ne va rien supposer à leur sujet, si ce n’est qu’elles existent ; en particulier la fréquence avec laquelle elles apparaissent peut être, a priori, quelconque. Cependant, et ceci est la partie ‘Bell’ de l’argument, si l’on regarde la statistique des réponses lorsque des *questions différentes* sont posées aux deux portes, on observe que la fréquence des événements dans laquelle les mêmes réponses sont données est égale à $1/4$. Et cela mène à une contradiction : en effet, comme $v(\alpha)$ ne peut prendre que deux valeurs, *oui* et *non*, il faut nécessairement que, dans chaque expérience, au moins un des trois événements suivants se produisent : $v(A) = v(B)$, ou $v(A) = v(C)$, ou encore $v(B) = v(C)$ (en fait, une ou trois de ces identités sont satisfaites simultanément). Par conséquent, si l’on additionne les fréquences de ces événements, on doit obtenir un nombre supérieur ou égal à 1. Mais chacune de ces fréquences, comme mentionné ci-dessus, vaut $1/4$, et leur somme $3/4$, qui n’est pas supérieur à 1, d’où une contradiction.

Quelle est la conclusion de tout cela ? Dans ce raisonnement, nous avons fait une seule hypothèse : l’absence de « communication » entre les deux personnes une fois que les questions leur avaient été posées. Revenons maintenant à un langage moins anthropomor-

phique et appelons « localité » cette hypothèse - et acceptons qu'il n'y ait aucune forme d'action (à distance, instantanée) entre les deux portes. Alors, nous sommes conduits à une contradiction, de sorte que cette hypothèse doit être abandonnée.

On ne saurait trop insister sur la logique de l'argument : les corrélations parfaites plus l'absence de communication (c'est-à-dire la localité) entre les deux personnes séparées, nous conduit à postuler l'existence de variables $v(\alpha)$ (partie 'EPR' de l'argument). Cependant, le simple fait d'accepter que ces variables existent conduit à une contradiction avec les résultats observés lorsque des questions différentes sont posées (partie 'Bell' de l'argument). Pour le dire autrement : la localité plus une corrélation parfaite implique l'existence de ces variables ; cependant, ces dernières plus la statistique lorsque des questions différentes sont posées impliquent une contradiction. A la fois les corrélations parfaites et la statistique pour les angles différents sont des résultats empiriques ; le reste est une déduction logique ; l'unique hypothèse était l'absence de « communication » ou la localité. Donc, la localité doit être abandonnée, point à la ligne.

Evidemment, on n'a jamais fait de telles expériences avec des personnes, mais il est bien connu qu'il existe des observations faites avec des paires de photons corrélés qui reproduisent ces statistiques apparemment « impossibles » ; deux photons sont émis par une source commune et sont envoyés vers des détecteurs (les deux portes) éloignés l'un de l'autre. Les questions correspondent à trois angles différents le long desquels la polarisation est « mesurée » et les réponses oui/non correspondent aux deux résultats possibles (dépendant de la situation, nous pouvons avoir des corrélations parfaites ou des anti-corrélations parfaites, mais cela n'affecte pas le fond de l'argument). Finalement, le nombre $1/4$ provient de calculs standards en mécanique quantique.

2. Incompréhensions

Abandonner la localité revient à admettre une forme d'action à distance, peut-être subtile (et dont la nature exacte n'est pas déterminée par l'argument de Bell) mais une action quand même. Discutons plus en détail ce que cette non-localité est réellement, ce qu'elle n'est pas, et les incompréhensions auxquelles elle donne lieu.

Le fond du problème vient de ce que les variables $v(\alpha)$ sont à nouveau des « variables cachées », ce qui veut simplement dire qu'elles décrivent l'état du système plus en détail que ne le fait la fonction d'onde ou, encore, que leur valeur n'est pas déterminée par celle-ci. Simplement supposer que ces valeurs existent revient à dire que la fonction d'onde n'est pas une description complète du système. Elles sont « locales » en ce sens que les personnes (ou les photons) les déterminent lorsqu'elles sont ensemble, au milieu de la pièce, et qu'elles les emportent avec elles lorsqu'elles vont vers les portes (ou vers les deux détecteurs).

Par conséquent, on résume souvent le résultat de Bell en disant qu'il a montré que des variables cachées locales n'existent pas. Ce qui est vrai, mais revient à oublier la partie EPR (Einstein, Podolsky et Rosen, [24]) de l'argument, que Bell, lui, comprenait très bien et rappelait lorsqu'il parlait de son théorème. Or, cette partie de l'argument peut être formulée comme menant à une alternative : ou bien le monde est non-local, ou bien les variables $v(\alpha)$ existent. Énoncé ainsi, le raisonnement de EPR est tout-à-fait correct. Malheureusement, ce n'est pas ainsi que EPR formulèrent leur résultat¹⁹. Ils pensaient que la localité était une évidence et que, par conséquent, ils avaient montré que la mécanique quantique était incomplète (c'est-à-dire que la description complète de l'état d'un système devait inclure des variables telles que $v(\alpha)$ non déterminées par la fonction d'onde).

Soulignons que Bell se plaint lui-même de ce que son théorème soit presque systématiquement interprété comme simplement une réfutation des théories de variables cachées, en oubliant les conséquences concernant la localité : « Mon premier article sur le sujet (Physics **1**, 135 (1965)²⁰) commence par un résumé de l'argument EPR, déduisant de la localité les variables cachées déterministes. Mais les commentateurs ont presque universellement dit que cet article partait de variables cachées déterministes » ([7], p.157). Quant au débat Bohr-Einstein, dont la plupart des physiciens imaginent qu'il a été gagné par Bohr, voici ce qu'en dit Bell ; il commence par imaginer des jumeaux séparés qui auraient un comportement identique dans les moindres détails. Devant un tel phénomène, l'hy-

¹⁹Par ailleurs, mais ce n'est pas essentiel ici, ils présentaient leur argument en utilisant d'autres variables que celles utilisées ici. La version présentée ici est due à David Bohm.

²⁰Voir Chapitre 2 de [7].

pothèse la plus naturelle serait, même si elle est surprenante, celle d'un déterminisme génétique. Mais dans la situation quantique, cela ne marche pas, et Bell ajoute : « Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées semblent exiger une sorte d'hypothèse 'génétique' (des jumeaux identiques, qui ont des gènes identiques). Pour moi, il est si raisonnable de supposer que les photons dans ces expériences emportent avec eux des programmes, qui sont corrélés à l'avance, et qui dictent leur comportement. Ceci est si rationnel que je pense que quand Einstein a vu cela et que les autres refusaient de le voir, il était l'homme rationnel. Les autres, bien que l'histoire leur ait donné raison, se cachaient la tête dans le sable. Je pense que la supériorité intellectuelle d'Einstein sur Bohr, dans ce cas-ci, était énorme ; un immense écart entre celui qui voyait clairement ce qui était nécessaire, et l'obscurantiste. Aussi, pour moi, il est dommage que l'idée d'Einstein ne marche pas. Ce qui est raisonnable ne marche simplement pas ». ([8], p. 84). Il faut souligner que Bell est encore trop gentil : l'histoire n'a pas simplement donné raison aux adversaires d'Einstein. Ceux-ci ne voyaient pas clairement la non-localité présente dans la nature : que « nous ne puissions pas éviter le fait que l'intervention d'un côté ait une influence causale de l'autre » ([7], p. 150) n'est devenu clair qu'avec le résultat de Bell.

Il est difficile d'exprimer combien cette notion d'action à distance fait horreur à certains physiciens : Newton²¹ écrivait « qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à travers le vide et sans la médiation de quelqu'autre corps ... me paraît être une telle absurdité que je pense qu'aucune personne possédant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire » (Lettre à Bentley, 25 février 1692, [54], Vol 3, p. 253-254, cité dans dans [48], p.289 et dans [42], p. 213) et Einstein, parlant de la situation décrite dans l'article EPR disait « Ce qui existe réellement en un point B ne devrait pas dépendre du type de mesure qui est faite en un autre point A de l'espace. Cela devrait également être indépendant du fait que l'on mesure ou non quelque chose en A » ([14], cité dans [52], p. 121).

Quelles sont les réactions des physiciens contemporains face au théorème de Bell ? Le

²¹Qui avait introduit lui-même une forme d'action à distance, très différente néanmoins de celle révélée par Bell.

moins que l'on puisse dire c'est qu'elles varient. A un extrême, H. Stapp déclare que « le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science » ([62], cité dans [52], p.181) et un physicien de Princeton déclare « celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête » [50]. Mais l'indifférence est néanmoins la réaction la plus répandue. Mermin distingue différents types de physiciens [50] : ceux du premier type sont dérangés par EPR-Bell. La majorité (le type 2) ne le sont pas mais il faut distinguer deux sous-variétés. Ceux de type 2a expliquent pourquoi cela ne les dérange pas. Leurs explications tendent à être entièrement à côté de la question ou à contenir des assertions physiques dont on peut montrer qu'elles sont fausses. Ceux du type 2b ne sont pas dérangés et refusent de dire pourquoi. Leur position est inattaquable (il existe encore une variante du type 2b qui disent que Bohr a tout expliqué mais refusent de dire comment).

Les explications offertes par les physiciens du type 2a reviennent presque toujours, du moins d'après mon expérience personnelle, à déclarer qu'il n'y a pas d'action à distance, parce qu'on *apprend* simplement quelque chose sur la particule à droite en effectuant la mesure à gauche. Born adoptait cette position : « Le fond de la différence entre Einstein et moi était l'axiome que des événements se produisant à des endroits différents A et B sont indépendants l'un de l'autre en ce sens que l'observation de la situation en A ne peut rien nous *apprendre* sur la situation en B » [14]. Bell ajoute correctement : « l'incompréhension était totale. Einstein n'avait aucune difficulté à admettre que des situations à des endroits différents soient corrélées. Ce qu'il n'acceptait pas c'est que l'action en un endroit puisse influencer, immédiatement, la situation en un autre endroit ». [6]²². L'idée de Born, quand on la rend précise, mène justement aux « variables cachées » dont Bell montre que la simple existence est impossible.

Pour le dire autrement, imaginons que je coupe en deux une image et que j'envoie par courrier chaque moitié à des correspondants mettons l'un aux Etats-Unis, l'autre

²²Et Bell ajoute « Cette référence à Born n'est pas faite pour diminuer la stature d'une des plus grandes figures de la physique moderne, mais pour illustrer la difficulté qu'il y a à mettre de côté ses préjugés et à écouter ce qui est réellement dit. Ceci doit aussi vous encourager *vous*, cher auditeur, à écouter un peu mieux ».

en Australie. Ces deux personnes ouvrent simultanément leur courrier ; chacune apprend instantanément (étant supposé qu'elles sont au courant de la procédure) quelle moitié de l'image l'autre a reçu. Disons qu'il y a acquisition (instantanée) d'information à distance, mais il n'y a rien de mystérieux, et c'est ainsi que Born et de nombreux physiciens mécomprennent le résultat de EPR-Bell. Ce que le résultat de Bell nous dit, c'est que la situation EPR n'est nullement de ce type. Ici, chaque moitié de l'image correspondrait aux instructions dont Bell montre qu'elles n'existent pas.

Bell a inventé un exemple semblable, avec les chaussettes de Mr Bertlmann, une personne qui portait toujours des chaussettes de couleurs différentes (et qui ne se doutait peut-être pas que cette particularité allait lui apporter une telle renommée ...). Si on voit la couleur d'une chaussette, on sait immédiatement que l'autre chaussette est de couleur différente. Mais si cela n'a rien de surprenant, c'est évidemment parce que la couleur des chaussettes préexiste à l'observation-or l'analogie ici à la situation EPR serait de dire que l'observation d'une chaussette, *crée* sa couleur ainsi que, simultanément, celle sur l'autre pied, ce qui serait beaucoup plus étonnant. Néanmoins, un des plus grands physiciens contemporains, Murray Gell-Mann, se réfère à l'article de Bell ([6]) sur les chaussettes de Mr Bertlmann et en donne l'interprétation qui est l'exact opposé de ce qu'en dit Bell! ([29], p. 172). Voir aussi [35] pour d'autres exemples d'incompréhensions du théorème de Bell.

Pour souligner le caractère déconcertant de la non-localité exhibée par Bell, imaginons un sorcier ou un magicien qui agit réellement à distance : en manipulant une effigie il influence l'état de santé de la personne représentée par celle-ci.²³ Ce genre d'action (imaginaire) à distance a quatre propriétés remarquables :

- 1) elle est instantanée, ou, du moins, comme on est dans l'imaginaire, on peut le supposer ;

²³Voir, par exemple, les ouvrages bien connus de mécanique quantique « Les sept boules de cristal » et « Le temple du soleil », Hergé, éd. Casterman. Comme je l'expliquerai plus loin, je ne pense nullement que la non-localité exhibée par la physique quantique ait quoique se soit à voir avec la magie, la parapsychologie, le « New Age », les médecines « holistes » et autres choses du même genre. Pour une bonne critique des pseudo-sciences, voir [16], et surtout [28] sur l'usage abusif de l'expérience EPR par des parapsychologues.

- 2) elle est individuée : c'est une personne particulière qui est touchée et pas celles qui sont à côté ;
- 3) elle est à portée infinie : même si la personne en question se réfugiait sur la lune, elle n'échapperait pas à l'action du sorcier ;
- 4) elle permet la transmission de messages : on peut coder un message sous forme d'une suite de 0 et de 1 et l'envoyer en faisant correspondre un "1" à l'action du magicien, pendant une unité de temps, et un "0" à son absence d'action.

Ce qui est extraordinaire avec la non-localité quantique c'est qu'elle a les trois premières propriétés « magiques » *mais pas la quatrième*. Les propriétés deux et trois sont sans doute les plus surprenantes : si l'on envoie un grand nombre de paires de particules en parallèle, un appareil de mesure à gauche va influencer l'état de la particule à droite qui est « jumelle » de celle qui est mesurée et non pas les autres. De plus, cette action ne décroît pas en principe avec la distance, contrairement à toutes les forces connues en physique²⁴. Finalement, cette action semble instantanée, en tout cas elle se propage plus vite que la vitesse de la lumière [3]. Mais elle ne permet pas d'envoyer des signaux. La raison en est simple : quelle que soit l'orientation de l'appareil de mesure à gauche, le résultat à droite sera une suite aléatoire de « oui » et de « non ». Tant qu'on ne regarde les résultats que d'un seul côté, il n'y a aucun moyen de savoir ce qui se passe de l'autre côté. Ce n'est qu'a posteriori qu'on peut comparer les suites de résultats obtenus et constater la présence de corrélations étranges. Le caractère aléatoire des résultats bloque en quelque sorte la transmission de messages (voir [42], [45] pour une discussion plus approfondie).

On ne saurait trop insister sur cet aspect de la situation EPR : ceci la distingue radicalement de toute forme de magie et invalide à l'avance les efforts de ceux qui voudraient voir dans le résultat de Bell une porte ouverte pour une justification scientifique de phénomènes paranormaux.

Mais les autres aspects sont bien là, et ils sont déconcertants : instantanéité, individualité, non-décroissance avec la distance. Du moins, c'est la conclusion qu'on peut tirer

²⁴Pourvu que les particules soient isolées, ce qui est impossible en pratique pour de grandes distances. Par ailleurs, il ne s'agit pas d'une « force » mais d'un phénomène nouveau.

aujourd'hui, au vu des résultats expérimentaux.

De plus, il faut se garder de conclure que l'impossibilité d'envoyer des signaux signifie qu'il n'y a pas d'action à distance ni de relation de cause à effet. Le concept de cause est compliqué à analyser mais, comme le fait remarquer Maudlin [45], les tremblements de terre ou le Big Bang ne sont pas contrôlables et ne permettent donc pas l'envoi de signaux mais ce sont néanmoins des causes ayant certains effets. La notion de signal est trop anthropocentrique pour que l'idée de cause puisse lui être réduite.

Comme cette action à distance est instantanée ou du moins plus rapide que la vitesse de la lumière, n'entre-t-elle pas en contradiction avec la relativité? C'est une question assez complexe qui ne sera pas développée ici (voir [45] pour une discussion approfondie de ce problème) mais il est clair qu'il y a un problème. Comme le dit Penrose : « Il y a essentiellement un conflit entre notre image spatio-temporelle de la réalité physique - même l'image quantique non-locale qui est correcte - et la relativité restreinte! » [59]. Mais comme l'inégalité de Bell est interprétée en général de façon incorrecte, le problème du conflit (subtil mais réel) non-localité / relativité est rarement discuté par les physiciens. Néanmoins, il faut souligner que la simple existence d'une théorie quantique et relativiste des champs (dont les prédictions sont les plus spectaculairement vérifiées par l'expérience dans toute l'histoire des sciences) ne permet pas de nier le problème. En effet, la réduction de la fonction d'onde n'est nulle part traitée de façon relativiste. Et c'est via cette opération que la non-localité s'introduit de façon explicite dans le formalisme quantique.

Au vu du caractère contre-intuitif de la non-localité et du conflit avec la relativité, il est tentant de reprendre l'argument, de l'analyser en détail et de voir s'il n'y a pas une échappatoire ou une faille dans les arguments esquissés ici. On peut dire que tout ou presque a été essayé, par exemple l'idée d'une action du futur sur le passé ou d'une explication des corrélations EPR comme simples coïncidences (voir par exemple [51], [6], [26] ou [17] pour différentes tentatives et Maudlin [45] pour une discussion critique).

VI Solutions possibles

Mettons de côté la question de la non-localité, et revenons au fait que l'interprétation optimiste, implicite, est intenable. Est-on alors forcé d'adopter l'interprétation littérale, c'est-à-dire de considérer que la mécanique quantique, et par conséquent la science toute entière (puisque tous les phénomènes naturels sont *in fine*, quantiques), ne s'occupe, en principe, que de mesures effectuées dans nos laboratoires ?

Pour comprendre les types de solutions possibles à ce problème, on peut commencer par se demander laquelle des trois propositions suivantes abandonner. On pourrait vouloir, a priori, les affirmer toutes simultanément, mais elles sont incompatibles entre elles, comme on l'a vu dans l'annexe de la section II ²⁵ :

- 1) Les appareils de mesure, et les autres objets macroscopiques tels que les chats sont dans des états macroscopiques bien définis.
- 2) La fonction d'onde est la description complète d'un système physique.
- 3) L'évolution de Schrödinger est toujours correcte et s'applique à tout, y compris aux appareils de mesure.

Selon le choix que l'on fait, on s'engage dans une des trois directions suivantes :

- On abandonne 1), les différents états macroscopiquement distincts des appareils de mesure et les chats vivants et morts coexistent. On s'oriente alors vers l'idée des univers multiples.
- On abandonne 2), ce qui veut dire qu'on introduit des « variables cachées », qui complètent la description du système, comme dans la théorie de Bohm, qui est la tentative la plus développée allant dans ce sens, et qui sera discutée ci-dessous.
- On abandonne 3), la dynamique doit être stochastique ou non-linéaire puisque les seules propriétés de l'évolution de Schrödinger qu'on a utilisé pour arriver à l'état (2.3) étaient le caractère linéaire et déterministe de cette évolution.

Pour ce qui est de la première approche, qui est souvent présentée comme une possibilité sérieuse mais qui est rarement explicitée, et dont la cohérence est loin d'être évidente,

²⁵Voir aussi Maudlin[45].

voir Bell ([7], chapitres 11 et 15), Maudlin [46] et Albert [1] pour une critique plus approfondie.

Pour Bell, seules les solutions 2 et 3 mènent à une « image précise » [5]. Si l'on cherche à développer la troisième solution, il faut modifier l'équation de Schrödinger et la remplacer par une équation non-linéaire ou stochastique. Celle-ci devrait avoir deux propriétés : être suffisamment bien approximée par l'équation de Schrödinger lorsqu'on discute d'un petit nombre de particules, de façon à ce que les prédictions de la mécanique quantique restent vraies pour la nouvelle théorie, et se ramener, lorsqu'on parle d'un grand nombre de particules (par exemple, un appareil de mesure), essentiellement à l'opération de réduction de la fonction d'onde. Vu la difficulté mathématique inhérente au traitement d'équations non-linéaires, le fait qu'il n'existe aujourd'hui aucune solution satisfaisante de ce type ne peut pas être considérée comme un argument très fort contre cette suggestion : comme la plupart des physiciens considèrent la mécanique quantique ordinaire comme acceptable, peu d'essais, en fin de compte, ont été faits. L'un des partisans de cette approche, Roger Penrose écrit : « Néanmoins, je pense qu'il serait surprenant si la théorie quantique ne devait pas subir un profond changement dans l'avenir - vers quelque chose dont cette linéarité serait seulement une approximation. Il y a certainement des antécédents de ce genre de changements. La puissance et l'élégance de la théorie de la gravitation universelle de Newton est en grande partie due au fait que les forces dans cette théorie s'additionnent linéairement. Mais, avec la relativité générale d'Einstein, on voit que cette linéarité est seulement une approximation - et l'élégance de la théorie d'Einstein dépasse même celle de la théorie de Newton » [59]. Comme une telle théorie non-linéaire n'existe pas pour le moment, il faut signaler qu'on peut formuler une théorie stochastique, où la fonction d'onde est réduite aléatoirement, avec une faible probabilité pour un système microscopique, à tout moment. Mais quand on considère un grand nombre de particules, comme dans un appareil de mesure, la probabilité d'une réduction devient grande. Dans sa formulation actuelle, la théorie paraît fort ad hoc (les paramètres qui caractérisent cette réduction probabiliste sont posés de façon à être en accord avec l'expérience) ; néanmoins, ce n'est pas une mince qualité que de rendre compte des phénomènes quantiques de façon précise. Dans cette théorie, appelée « GRW » d'après les noms de ses auteurs (G.C. Ghirardi,

A. Rimini, et T. Weber) [32], il n'y a aucun mystère lors de la mesure : simplement les « sauts quantiques » qui se produisent partout et tout le temps sont amplifiés à cause du caractère nécessairement macroscopique de l'appareil de mesure.

Concernant le deuxième type de solution, le seul exemple développé en détail est la théorie de Bohm [10]. Dans celle-ci, la fonction d'onde n'est pas la description complète de l'état du système. Ce dernier est donné à la fois par la fonction d'onde habituelle et par les positions de toutes les particules : pour un système de n particules, l'état complet du système est donné par (Q, Ψ) où Ψ est la fonction d'onde et $Q = (q_1, \dots, q_n)$ dénote les positions des particules. Ce sont les « variables cachées » de la théorie.

Dans cette théorie, la fonction d'onde évolue selon l'équation de Schrödinger habituelle, mais elle *guide* l'évolution des particules, en ce sens que la vitesse de chaque particule est une fonction déterminée par la fonction d'onde et les positions des autres particules. Concrètement, l'équation (dont la compréhension n'est pas nécessaire pour la suite de l'exposé) est donnée par :

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{\hbar}{m_i} \operatorname{Im} \frac{\Psi^* \nabla_i \Psi}{\Psi^* \Psi} \quad i = 1, \dots, n \quad (6.1)$$

(∇_i est le gradient par rapport à q_i , m_i est la masse, $\Psi = \Psi(q_1, \dots, q_n)$ et Ψ^* est le complexe conjugué de Ψ).

La dynamique de Bohm n'est pas philosophiquement différente de la mécanique classique mais elle est néanmoins fortement non-classique dans des situations concrètes²⁶.

La théorie de Bohm s'arrête (presque) là. Voyons ce qu'elle implique. Première remarque : elle est complètement déterministe : étant donné (Q_0, Ψ_0) , en un temps initial, les positions et la fonction d'onde en des temps ultérieurs sont déterminés. Ce qui est plus important, c'est que c'est une théorie qui a, comme on dit parfois, une ontologie, c'est-à-dire que les particules ont des propriétés indépendamment du fait qu'on les mesure ou non : en effet, elles ont, à tout moment, des positions et donc des trajectoires.

²⁶Par exemple, dans l'expérience des deux trous (voir [25]) la particule passe par un trou mais sa fonction d'onde, qui la guide, est différente selon que le deuxième trou est ouvert ou non, et ceci entraîne les phénomènes d'interférence que l'on observe. Voir [66] pour une simulation numérique de cette expérience, du point de vue de la théorie de Bohm.

Ceci élimine tout ‘problème de la mesure’ : en effet, si on y réfléchit un instant, on s’aperçoit que toutes nos mesures sont, en fin de compte des mesures de position : par exemple, lorsqu’on mesure la vitesse d’une voiture, on regarde en fait la position du compteur. De même, les positions des particules composant le chat suffisent à déterminer s’il est vivant ou mort. Il est facile de voir que c’est le cas pour toutes les ‘mesures’ : si les positions de toutes les particules de l’appareil sont déterminées, alors le résultat l’est aussi. Donc, il n’y a nul besoin, dans cette théorie, d’accorder a priori un statut spécial à l’observateur, à la mesure etc...

On peut néanmoins se poser quatre questions :

- 1) Cette théorie obtient-elle les mêmes résultats expérimentaux que la mécanique quantique, et si oui, comment ?
- 2) Qu’en est-il de la réduction de la fonction d’onde ?
- 3) Comment évite-t-elle les théorèmes sur l’impossibilité des variables cachées ?
- 4) Qu’en est-il de la non-localité dans la théorie de Bohm, et qu’en est-il de la relativité ?

La réponse a chacune de ces questions est un peu technique et ne sera qu’esquissée ici, en renvoyant aux références, pour des justifications plus détaillées.

Pour la première question, on peut utiliser une conséquence élémentaire de l’évolution de Schrödinger et de l’équation (6.1) : si, au temps initial, les positions des particules sont distribuées aléatoirement selon la distribution quantique, alors elles le seront encore à tout temps ultérieur. Comme toutes les mesures sont en fin de compte des mesures de position, les prédictions de la théorie de Bohm seront les mêmes que celles de l’algorithme quantique, même si l’on ‘mesure’ des quantités autres que la position (vitesse, moment angulaire, etc.).

Par ailleurs, le fait que les positions des particules sont distribuées aléatoirement selon la distribution quantique, implique aussi qu’il n’y a pas moyen d’aller ‘au-delà’ des prédictions quantiques, c’est-à-dire de contrôler les variables de façon à pouvoir prédire les résultats de façon plus précise que ne le fait le formalisme usuel. Une façon intuitive de

comprendre cela, est de se rendre compte que ce qui nous permet de contrôler certaines variables, c'est toujours le fait qu'il y a quelque chose d'extérieur à ces variables et qui est structuré ou ordonné (entre autres, les appareils et les êtres humains qui les manipulent). Si le monde était, par exemple, réduit à un gaz à l'équilibre, c'est-à-dire complètement désordonné, il n'y aurait rien, dans ce monde-là, qui pourrait contrôler quoi que ce soit. L'hypothèse qui est faite ici est une sorte d'hypothèse de désordre ou d'équilibre quantique, conditionné par la fonction d'onde. Cette dernière incorpore l'ordre qui existe au niveau habituel, classique, mais, étant donnée la fonction d'onde, les positions sont distribuées de façon aussi désordonnée que possible. Si cette hypothèse s'applique à tout ce qui existe, alors il n'y a nulle part de source d'ordre qui permettrait de contrôler les variables au-delà ce que permet la mécanique quantique usuelle. Les fameuses inégalités d'Heisenberg reflètent simplement, de façon quantitative, cette incapacité. Dans la théorie de Bohm, elles ne sont nullement un mystère, mais illustrent simplement les limites que la structure objective du monde impose à nos connaissances (voir [20]).

Évidemment, on peut se demander ce qui justifie le fait de supposer que la distribution aléatoire initiale soit en accord avec la mécanique quantique. D'abord, il faut remarquer que, dans une théorie déterministe, tout résultat statistique suppose une hypothèse statistique sur les conditions initiales du système. Le problème se pose, de façon identique, en mécanique statistique d'équilibre ou de non équilibre, ou pour justifier la deuxième loi de la thermodynamique. La question est de savoir dans quelle mesure ces hypothèses sont naturelles. De plus, en principe, ces hypothèses renvoient à des hypothèses sur les conditions initiales de l'Univers. Comme l'explique Penrose [59], pour rendre compte de la deuxième loi de la thermodynamique, on doit supposer que l'Univers a commencé dans des conditions extrêmement « improbables ». Les hypothèses que l'on doit faire dans le cadre de la théorie de Bohm sont bien plus naturelles que ce genre d'hypothèses (voir [20] pour plus de détails et [15] pour une critique).

Pour ce qui est de la deuxième question, il y a, dans la théorie de Bohm, une réduction « effective » de la fonction d'onde (cfr l'annexe de la section II). Lors d'une mesure, si l'on obtient une fonction d'onde telle que (2.3), il se fait que les supports de Φ_1 et de Φ_2

sont en général pratiquement disjoints (parce qu'il s'agit d'appareils macroscopiques), et le restent dans le futur. Or la particule se trouve soit dans le support de $\Phi_1\Psi_1$ soit dans le support de $\Phi_2\Psi_2$ et elle n'est, à peu de choses près, guidée que par la « partie » de la fonction d'onde dans le support de laquelle elle se trouve (en vertu de l'équation (6.1)).

Donc, d'un point de vue pratique, on peut « oublier » l'autre partie (ou « branche ») de la fonction d'onde. La réduction a bien lieu, mais elle n'est ni un principe fondamental ni un mystère (voir [1] [2] et surtout [20] pour une discussion plus approfondie).

Pour ce qui est des 'variables cachées', ce qui est essentiel à comprendre et qui, en général, ne l'est pas, c'est qu'il n'existe pas de variables cachées dans la théorie de Bohm, autre que les positions. En particulier il n'existe pas de valeurs $v(A)$, préexistantes à la mesure, pour des quantités telles que la vitesse, l'énergie ou le moment angulaire. En fait, il ne pourrait pas y en avoir, du moins, en général, à cause des théorèmes sur les variables cachées. De plus, comme toutes les mesures sont en fin de compte des mesures de positions, ces variables additionnelles mèneraient soit à des redondances soit à des contradictions : en effet, la situation est ici la même qu'en mécanique classique : si les trajectoires de toutes les particules de l'univers sont fixées, tout le reste l'est aussi - les énergies, les vitesses etc. Donc, soit ces valeurs additionnelles coïncident avec celles qui sont induites par les trajectoires, et elles sont redondantes, soit elles ne coïncident pas avec elles et on aboutit à des contradictions.

Mais il est intéressant d'aller plus loin ; en effet, un des aspects les plus positifs de la théorie de Bohm est qu'elle explique le rôle essentiel de l'appareil de mesure. Comme on vient de le voir, étant donné que la théorie de Bohm est déterministe, si on se donne la position initiale et la fonction d'onde initiale de la particule, ainsi que les détails du dispositif de mesure, le résultat est déterminé. Mais il faut préciser ces « détails ». L'appareil de mesure agit sur la fonction d'onde de la particule à travers l'équation de Schrödinger ; la fonction Ψ , à son tour, guide la particule. Mais, et c'est ici que se trouve le point subtil, l'action de l'appareil n'est pas définie uniquement par la quantité physique qu'il est supposé mesurer. On peut, par exemple, envisager une situation où l'on « mesure le spin » (le spin peut être vu ici comme une sorte de moment angulaire) et où, en tournant

l'appareil, on change le résultat de « spin up » en « spin down », même si l'on « mesure » *la même particule avec la même position initiale et la même fonction Ψ de départ* ([2]). Ceci montre que, ce qui se passe lors d'une « mesure » est en réalité une interaction entre un système (la particule) et un dispositif expérimental, où il ne suffit pas de spécifier l'observable à laquelle correspond le dispositif expérimental, mais encore la constitution précise du dispositif. Le rôle actif de l'appareil de mesure a évidemment été souligné par Bohr, mais dans un langage a priori ou philosophique, alors que, dans la théorie de Bohm, ce rôle découle naturellement des équations de la théorie.

Finalement, quelle est la relation entre la théorie de Bohm et la non-localité? C'est une qualité supplémentaire de cette théorie que de rendre compte de façon naturelle de la non-localité. En effet, la fonction d'onde est définie sur l'espace de configuration²⁷. Par exemple, pour deux particules on a $\Psi = \Psi(x_1, x_2)$ et il se peut que le support de Ψ soit donné par $x_1 \in V_1, x_2 \in V_2$, où V_1 et V_2 sont des régions de l'espace éloignées l'une ou l'autre. On peut agir sur Ψ , via l'équation de Schrödinger, grâce à une interaction physique localisée dans V_2 . Mais ceci influence le comportement de la particule n° 1, via l'équation (6.1). Dans l'expérience EPR-Bell, c'est exactement ce qui se passe du point de vue de la théorie de Bohm : si l'on effectue une 'mesure' sur la particule 1, c'est-à-dire qu'un appareil de mesure interagit avec elle, la fonction d'onde est réduite (en pratique). Mais à cause de la structure particulière de la fonction d'onde dans la situation EPR-Bell, sa réduction affecte la particule 2, et cela instantanément et quelle que soit la distance entre les deux particules ; du moins en principe, c'est-à-dire tant que les particules restent isolées du reste de l'univers, ce qui est difficile à réaliser en pratique pour de longues distances.

Comment réconcilier la théorie de Bohm avec la relativité, vu qu'elle est non-locale? Il faut ici distinguer deux questions : Premièrement, peut-on avoir une théorie 'à la Bohm', ou 'à la GRW' qui rende compte des résultats prédits par les théories quantiques relativistes, comme la théorie quantique des champs? Deuxièmement, cette théorie sera-t-elle

²⁷Pour un système à plusieurs particules. Par contre, un champ classique, par exemple le champ électromagnétique, est toujours défini sur l'espace réel.

véritablement relativiste, c'est-à-dire, en termes techniques, invariante sous le groupe de Lorentz ?

Pour ce qui est de la première question, il existe plusieurs propositions : par exemple celle due à Bell dans « Beables for quantum field theory » [7]²⁸. Même si cette théorie n'est pas totalement satisfaisante, Bell ne voit pas de problème de principe pour répondre positivement à la première question. Mais la théorie ainsi formulée n'est pas nécessairement invariante sous le groupe de Lorentz (pour une version de cette théorie qui possède une telle invariance, voir [65]). Ce qui pose un problème mais pas « parce qu'elle est contredite par les faits ». Elle rend compte de la façon habituelle de l'expérience de Michelson-Morley et des autres expériences justifiant la relativité. Mais il existe un repère privilégié qui permet de définir une relation de cause à effet objective²⁹. L'introduction d'un repère privilégié est rendu presque inévitable, à cause de la non-localité, si on veut préserver l'idée de causalité, c'est-à-dire l'idée que les causes précèdent leurs effets. En effet, dans une théorie complètement invariante sous le groupe de Lorentz dans laquelle des actions à distance existent, il existe aussi nécessairement des actions allant du futur vers le passé. Mais, de même que la non-localité est compatible avec l'absence de transmission de signaux, le repère privilégié permettant de définir une relation de cause à effet peut parfaitement être inobservable. Ce qui fait qu'on se trouve dans une situation paradoxale d'une théorie dont les prédictions sont entièrement en accord avec celle de la théorie de la relativité, mais qui n'est pas strictement invariante sous le groupe de Lorentz. Comme le dit Bell, c'est une façon 'excentrique' de faire le monde ([7], p. 180) ; mais la seule alternative, c'est d'admettre des actions allant du futur vers le passé, ou de renoncer totalement à la notion de cause et d'effet, comme il est naturel de le faire dans une théorie intrinsèquement stochastique. Et ce genre de dilemme provient simplement de la tension entre la relativité et la non-localité inhérente à la mécanique quantique, pas d'un quelconque intérêt pour le réalisme.

²⁸Voir [65], et les références citées là, pour une revue des développements plus récents des théories quantiques des champs de type Bohm ou GRW.

²⁹Bell explique qu'il n'y a, en fait, aucune incohérence ni aucune contradiction avec l'expérience à présenter la relativité au moyen d'un repère privilégié ([7] chapitre 9).

Remarquons quand même que l'objection fréquemment adressée à la théorie de Bohm, à savoir qu'elle est « non-locale, donc incompatible avec la relativité » est étrange : après tout, ce que le théorème de Bell montre, c'est qu'une théorie qui fait des prédictions expérimentales correctes doit être non-locale. Par conséquent, être non-locale devrait être considéré, pour une théorie, comme une vertu et non comme un défaut. La tension avec la relativité est là, quoi qu'on fasse. La théorie quantique usuelle 'évite' le problème mais seulement en se limitant à parler de 'résultats de mesure' ou encore, en ignorant le problème posé par Bell et en ne traitant nulle part de façon relativiste la réduction de la fonction d'onde, qui est la façon dont la non-localité est reflétée dans la théorie usuelle.

En résumé, il y a au moins deux approches alternatives qui s'offrent à qui veut comprendre la mécanique quantique comme représentant plus qu'un algorithme permettant de prédire certains résultats d'expériences. L'une, modifier l'équation de Schrödinger, est essentiellement à l'état de suggestion, à moins d'introduire un modèle intrinsèquement aléatoire, tel GRW. L'autre, introduire des « variables cachées » (c'est-à-dire simplement les positions des particules), a l'avantage d'être une théorie parfaitement développée, et qui rend compte de tous les faits expérimentaux invoqués pour justifier la mécanique quantique non-relativiste. Bien que ce soit en partie une question de goût, la théorie de Bohm est aussi naturelle et élégante que n'importe quelle autre théorie fondamentale en physique. Aucun problème d'inconsistance ou de subjectivisme ne subsiste, et la fonction d'onde y acquiert une signification physique bien précise.

Pour conclure, on peut citer le philosophe des sciences américain David Albert, pour qui la théorie de Bohm est une théorie sur le mouvement des corps matériels qui ne contient « rien de cryptique, rien de métaphysiquement neuf, rien d'ambigu, rien d'inexplicite, rien de vague, rien d'incompréhensible, rien d'inexact, rien de subtil, une théorie dans laquelle toutes les questions ont un sens et ont une réponse et où il n'y a jamais deux propriétés de quoi que ce soit qui sont « incompatibles » l'une avec l'autre ». ([1], p.169). Ajoutons, avec moins de lyrisme, que cette théorie rend précise l'intuition de Bohr concernant le rôle de l'appareil de mesure, donne un sens physique clair à la fonction d'onde et enlève tout mystère à l'origine des probabilités en mécanique quantique. De plus, elle fait tout

cela en ajoutant une ligne (l'équation (6.1)) au formalisme habituel, et elle rend ainsi la théorie parfaitement déterministe, contredisant par là toutes les « démonstrations » de l'impossibilité d'une telle entreprise. Pourquoi cette théorie, due à un des plus grands physiciens de notre temps, est pratiquement universellement ignorée est une énigme que les historiens des sciences du futur auront à résoudre. Dans la section suivante, certaines des étapes historiques qui ont rendu cette ignorance possible seront esquissées.

VII Considérations historiques

Dans la première moitié du vingtième siècle, une philosophie à tendance sceptique, reliée, mais de façon complexe, au positivisme, a dominé l'atmosphère dans laquelle la mécanique quantique s'est développée. Cette philosophie mettait au centre de ses préoccupations l'observation, les mesures ou les données immédiates des sens. Toute tentative visant à construire une théorie objective du monde étaient jugées avec méfiance, et étaient suspectées de vouloir revenir à la métaphysique médiévale discréditée. Il faut souligner que, vu la bizarrerie des phénomènes observés à l'époque, vu le caractère extraordinairement neuf du formalisme quantique et vu le succès non moins extraordinaire rencontré par ce formalisme dans la prédiction de ces phénomènes, il était normal, et jusqu'à un certain point souhaitable, que cette philosophie ait été l'arrière-pensée de physiciens de cette époque.

Cette attitude se reflétait d'ailleurs dans d'autres domaines de la philosophie et des sciences : dans les courants du positivisme logique tendant vers l'instrumentalisme, par peur de la 'métaphysique' ; dans le behaviorisme, lorsqu'il voulait limiter l'étude 'scientifique' de l'esprit à une série de réponses à des stimuli, par peur du 'mentalisme' ; dans l'attitude formaliste en mathématique, qui ramenait celle-ci à un jeu d'écriture, par peur des contradictions ; et finalement, dans l'approche fréquentiste en théorie des probabilités, par peur des 'paradoxes' qui peuvent apparaître dans l'approche bayésienne.

Mais ce qui est bon pour un temps ne l'est pas nécessairement pour un autre. De partiellement progressiste qu'elle était, la philosophie quantique est devenue obscurantiste. Déjà à l'époque des pères fondateurs, Einstein, Schrödinger et d'autres voyaient que si l'on prenait à la lettre certains de ses slogans (« le rôle de la science se limite à prédire les résultats de mesure ») on abandonnait l'essentiel de l'entreprise scientifique. Mettre l'observateur au centre de tout (« l'homme est acteur et non pas spectateur dans le théâtre de la vie » [12]), c'était revenir aux illusions anthropocentriques du discours pré-scientifique. L'absence d'une formulation précise de la mécanique quantique encourage des discours confus et parfois franchement irrationnels.

Contrairement à ce qui est souvent dit aux étudiants, une personne au moins était parfaitement lucide : Einstein (il y en avait d'autres, Schrödinger par exemple, mais ils étaient rares). Celui-ci était revenu du 'machisme' (au sens de la doctrine de Mach) de sa jeunesse et voyait parfaitement les problèmes de la mécanique quantique, à la fois celui du 'chat de Schrödinger' et celui du dilemme, nécessité de variables cachées/non-localité, révélé par la situation EPR. Bien sûr EPR avaient fait le mauvais choix, si on veut, en pensant que la non-localité était impensable. Mais ils avaient vu le problème bien mieux que leurs critiques de l'époque.

Malheureusement, le théorème de Bell ne fut démontré qu'en 1964 près de trente ans après l'article EPR, et, entre 1935 et 1964, la majeure partie de la communauté des physiciens devint convaincue que Bohr avait répondu de façon satisfaisante à Einstein. Je ne discuterai pas ici ce que Bohr avait réellement en tête, et comment il avait été compris par la majeure partie de la communauté des physiciens³⁰. C'est un problème fascinant pour les historiens des sciences. Mais, puisque l'argument EPR avait simplement été oublié et puisque toute la question des variables cachées était de ce fait considérée comme la preuve d'un « lamentable attachement à la métaphysique », le résultat de Bell ne semblait ni particulièrement spectaculaire ni particulièrement dérangeant. Il semblait simplement confirmer les préjugés dominants sur l'impossibilité d'introduire des variables cachées et sur le caractère complet de la mécanique quantique. De fait, si on ne combine pas la partie 'EPR' et la partie 'Bell' de l'argument, aucune conséquence dramatique ne suit de l'argument de Bell. C'est, en un mot, pourquoi la majorité de la communauté des physiciens de la seconde moitié du XX^e siècle sous-estima la signification d'un des résultats les plus spectaculaires de l'histoire de la physique.

Par ailleurs, le théorème de Bell est une bonne illustration des vertus d'une attitude réaliste en philosophie des sciences. Pauli comparait le problème de savoir si quelque chose dont on ne peut rien connaître existe néanmoins avec la vieille question du nombre d'anges qui peuvent s'asseoir sur la pointe d'une aiguille³¹, et il pensait que les questions d'Einstein étaient de ce type-là. Bell par contre connaissait la théorie de Bohm, la trouvait

³⁰Voir l'analyse critique que fait Bell dans ([7] p. 155).

³¹Dans une lettre de 1954 à Max Born, [14], p.223, cité par [52], p. 81.

satisfaisante, mais était préoccupé par son caractère non-local. Il voulait voir s'il y avait moyen de faire mieux ou si toute théorie concernant le monde réel aurait nécessairement cet aspect extraordinaire. Mais c'est en posant ce genre de questions « métaphysiques » qu'il est parvenu à son résultat.

Revenant à la théorie de Bohm (et à la théorie GRW), elle montre qu'il faut se garder d'être dogmatique avec les théorèmes d'impossibilité et de proclamer trop vite qu'on a atteint les limites de notre compréhension rationnelle du monde.

Laissons le dernier mot à John Bell qui, comme on l'a vu, était l'un des plus lucides défenseurs de la théorie de Bohm. Il explique que, lorsqu'il était étudiant, il avait lu le livre de Born [13], qui affirmait, sur la base d'une mauvaise compréhension de la signification du théorème sur l'impossibilité des variables cachées de von Neumann³², qu'une théorie déterministe sous-jacente à l'algorithme quantique était impossible. Mais, comme il le dit, « en 1952, je vis l'impossible accompli » ; c'était la théorie de Bohm. Il continue :

Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette 'onde-pilote' ? Ne serait-ce que pour signaler ce qu'elle avait d'erroné ? Pourquoi von Neumann ne l'a-t-il pas prise en considération ? Plus extraordinaire encore, pourquoi continuait-on à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978³³ ? Alors que même Pauli, Rosenfeld, et Heisenberg, ne pouvaient guère produire de critique plus sévère de la version de Bohm que de la dénoncer comme étant 'métaphysique' et 'idéologique'³⁴ ? Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les ouvrages de mécanique quantique ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique voie, mais comme un antidote à l'autosatisfaction régnante ? Pour montrer que l'imprécision, la

³²Pour ce qui est de l'intérêt de ce théorème, Bell en a fait une analyse détaillée ([7], chapitres 1, 4 et 17), dont la conclusion est exprimée en termes peu charitables : « La preuve de von Neumann, si vous la regardez vraiment, elle tombe en morceaux entre vos mains. Ce n'est pas simplement faux, c'est idiot ! » [4] La violence du propos doit être située dans le contexte : comment se fait-il que cet argument, dans lequel il n'y a effectivement rien, ait été pris au sérieux par tant de physiciens et de philosophes, pendant tellement longtemps, même après qu'il ait été réfuté en détail ? C'est de nouveau une question intéressante pour les historiens et les sociologues des sciences [60].

³³Voir Jost dans [70], p. 252.

³⁴Voir [58], [31].

subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposées de force par des faits expérimentaux, mais par un choix théorique délibéré? ([7], p. 160).

Bibliography

- [1] D. Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press, Cambridge 1992.
- [2] D. Albert, Bohm's alternative to quantum mechanics, *Scientific American*, May 1994.
- [3] A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analysers, *Phys.Rev.Lett.* **49**, 1804-1807 (1982).
- [4] J.S. Bell, Interview dans *Omni*, May 1988, p. 88.
- [5] J.S. Bell, Against « measurement » *Physics World*, **3** 33-40 (1990).
- [6] J.S. Bell, Bertlmann's socks and the nature of reality, Chapitre 16 dans [7].
- [7] J.S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- [8] J. Bernstein, *Quantum Profiles*, Princeton University Press, Princeton (1991).
- [9] D. Bohm, *Causality and Chance in Modern Physics*, Harper, New York (1957).
- [10] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables", Parts 1 and 2, *Phys. Rev.* **89**, 166-193 (1952).
- [11] N. Bohr, Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Phys. Rev.* **48**, 696-702 (1935).
- [12] N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Gonthier, Paris (1961).
- [13] M. Born, *Natural philosophy of cause and chance*, Clarendon, Oxford (1949).
- [14] M. Born (ed.), *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, Londres (1971).

- [15] J. Bricmont, Bayes, Boltzmann and Bohm : Probabilities in Physics. In : *Chance in Physics. Foundations and Perspective*, .3-21. Bricmont J. et al. (eds) Springer, Berlin, Heidelberg (2001).
- [16] H. Broch, *Au coeur de l'extraordinaire*, l'Horizon chimérique, Bordeaux (1992).
- [17] J.T. Cushing, E. MacMullin (eds.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory. Reflections on Bell's Theorem*, University of Notre Dame Press, Notre Dame (1989).
- [18] P.C.W. Davies, J.R. Brown (eds.), *The Ghost in the Atom (BBC interviews)*, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [19] B. d'Espagnat, *Une incertaine réalité*, Gauthier-Villars, Paris (1981).
- [20] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty, *J. Stat. Phys.*, **67**, 843-907 (1992).
- [21] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum chaos, classical randomness and Bohmian mechanics, *J. Stat. Phys.* **68**, 259-270 (1992).
- [22] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Naive realism about operators, *Erkenntnis*, **45**, 379-397 (1996).
- [23] D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Bohmian Mechanics and the Meaning of the Wave Function, contribution to Experimental Metaphysics, in *Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony*, Volume One, edited by R.S.Cohen, M. Horne, and J. Stachel, Boston Studies in the Philosophy of Science 193, 25-38 Kluwer, New York (1997), quant-ph/9512031.
- [24] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum mechanical description of reality be considered complete?, *Phys. Rev.* **47**, 777-780 (1935).
- [25] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading (1965).
- [26] R.P. Feynman, Simulating physics with computers, *Intern. Journal of Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).
- [27] P. Forman, Weimar culture, causality and quantum theory, 1918-1927 : adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment, *Hist. Studies in the Phys. Sci.* **3**, 1-115 (1971).

-
- [28] M. Gardner, *The New Age. Notes of a Fringe Watcher*, Prometheus Books, Buffalo (1988).
- [29] M. Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar*, Little, Brown and Co., London (1994).
- [30] M. Gell-Mann and J.B. Hartle, Quantum mechanics in the light of quantum cosmology, in, *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, W. Zurek, ed. Addison-Wesley, Reading, pp. 425-458 (1990); Alternative decohering histories in quantum mechanics, in, *Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics*, K.K. Phua and Y. Yamaguchi, eds. World Scientific, Singapore (1991); Classical equations for quantum systems, *Phys. Rev.* **D47**, 3345-3382 (1993).
- [31] A. George (ed.), *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Albin Michel, Paris (1953).
- [32] G.C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems, *Phys. Rev.* **D34**, 470-491 (1986).
- [33] S. Goldstein, J.L. Lebowitz, Quantum mechanics : does the wave function provide a complete description of physical reality? *The Physical Review : The first hundred years*, H.H. Stroke (ed.) AIP Press, Melville (NY) (1994).
- [34] S. Goldstein, Bohmian Mechanics and the Quantum Revolution, *Synthese* **107**, 145-165 (1996).
- [35] S. Goldstein, Quantum Philosophy : The Flight from Reason in Science, contribution to *The Flight from Science and Reason*, P. Gross, N. Levitt, and M.W.Lewis, eds. *Annals of the New York Academy of Sciences* **775**, 119-125 (1996), quant-ph/9601007.
- [36] S. Goldstein, Quantum theory without observers, *Physics Today*, March 1998 (p.42-46)-April 1998 (p.38-42); see also *Physics Today*, Letters, February 1999 (p.11).
- [37] S. Goldstein, S. Teufel, Quantum Spacetime without Observers : Ontological Clarity and the Conceptual Foundations of Quantum Gravity, in *Physics meets Philosophy at the Planck Scale*, edited by C. Callender and N. Huggett, 275-289; Cambridge University Press, Cambridge (2001), quant-ph/9902018.
- [38] D. Greenberger, M. Horn, A. Shimony, Z. Zeilinger, Bell's theorem without inequalities, *Am. J. Phys.* **58**, 1131-1143 (1990).
- [39] J. Gribbin, *Le chat de Schrödinger*, Le Rocher, Monaco (1984).

- [40] R.B. Griffiths, Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics, *J. Stat. Phys.* **36**, 219-272 (1984); A consistent interpretation of quantum mechanics using quantum trajectories, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2201 (1993).
- [41] W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard, Paris (1962).
- [42] N. Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, Garden City (1985).
- [43] M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York (1974).
- [44] P. S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris, Christian Bourgois (1986 [5^{ème} éd. 1825]).
- [45] T. Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell, Cambridge (1994, 2002, 2^{ème} éd.).
- [46] T. Maudlin, A modest proposal concerning laws, counterfactuals and explanations, in [47].
- [47] T. Maudlin, *The Metaphysics Within Physics*, Oxford University Press, Oxford, (2007).
- [48] E. McMullin, The explanation of distant action : Historical notes, dans [17], p. 272-302.
- [49] D. Mermin, Quantum mysteries for anyone, *Journal of Philosophy*, **78**, 397-408 (1981).
- [50] D. Mermin, Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory, *Phys. Today*, April 1985.
- [51] D. Mermin, Lettres et réponses dans *Physics Today*, December 1990.
- [52] D. Mermin, *Boojums All the Way Through*, Cambridge University Press, Cambridge (1990).
- [53] D. Mermin, Hidden variables and the two theorems of John Bell, *Rev. Mod. Phys.* **65**, 803-815 (1993).
- [54] *The Correspondence of Isaac Newton*, H. W. Turnbull, ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1959.

- [55] R. Omnes, Consistent interpretations of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **64**, 339-382 (1992); Logical reformulation of quantum mechanics I, *J. Stat. Phys.* **53**, 893-932 (1988).
- [56] S. Ortolí, J.P. Pharabod, *Le cantique des quantiques*, La Découverte, Paris (1984).
- [57] A. Pais, Einstein and the quantum theory, *Rev. Mod. Phys.* **51**, 863-914 (1979).
- [58] W. Pauli (ed.), *Niels Bohr and the Development of Physics*, Pergamon, Londres (1955).
- [59] R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford (1989).
- [60] T. Pinch, What does a proof do if it does not prove? in, *The Social Production of Scientific Knowledge*, E. Mendelsohn, P. Weingart, R. Whitley (eds), Reidel, Dordrecht (1977).
- [61] M. Redhead, *Incompleteness, Nonlocality and Realism*, Clarendon Press, Oxford (1987).
- [62] H. Stapp, Are superluminal connections necessary? *Nuovo Cimento*, **40B**, 191-204 (1977).
- [63] H. Stapp, Bell's theorem and the foundations of quantum physics, *Amer. J. Phys.* **53**, 306-317 (1985).
- [64] D. Stove, *The Plato Cult and Other Philosophical Follies*. Blackwell, Oxford (1991).
- [65] R. Tumulka, The "unromantic pictures" of quantum theory, *Journal of Phys. A* **40**, 3425-3273 (2007) quant-ph/0607 124.
- [66] J.P. Vigièr, C. Dewdney, P.E. Holland, A. Kyprianidis, Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics, in *Quantum Implications; Essays in Honour of David Bohm*, B.J. Hiley, F.D. Peat (eds), Routledge, Londres (1987).
- [67] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955).
- [68] S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage, London (1993).
- [69] J. A. Wheeler, in *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, A.R. Marlow ed. Academic Press, New York (1978).

[70] H. Woolf (ed.), *Some Strangeness in the Proportion*, Addison-Wesley, Reading (1980).