

CONTRE LA PHILOSOPHIE DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

Texte d'une communication faite au colloque "Faut-il promouvoir les échanges entre les sciences et la philosophie?" Louvain-la-Neuve, 24 et 25 mars 1994.

Jean Bricmont
FYMA
2, chemin du cyclotron
B-1348 Louvain La Neuve
Belgium
32-10-473277
Fax 32-10-472414
Home: 32-2-6540190

La "philosophie de la mécanique quantique" ou du moins ce qui a été longtemps présenté comme tel, n'a fait que cacher des problèmes internes à la théorie physique. De plus, elle a rendu difficile une véritable appréciation du théorème de Bell. Après avoir abordé le problème de la mesure et la non-localité, on passera en revue différentes tentatives de solutions qui ont été proposées pour donner une version (ou une alternative) complètement cohérente de la mécanique quantique.

I. Introduction

La philosophie tranquillisante de Heisenberg et Bohr - ou est-ce une religion ? - est si habilement échafaudée qu'elle permet aux vrais croyants de se reposer sur un oreiller si doux qu'il n'est pas facile de les réveiller.

A. Einstein

Lorsque j'ai étudié la mécanique quantique, j'ai appris que l'objet le plus fondamental de cette théorie, la fonction d'onde, ne décrivait pas le système physique considéré, mais la connaissance que nous en avons¹. En cela résidait l'originalité et l'étrangeté radicale de la mécanique quantique. Mais qu'est-ce que cela voulait dire? Certainement pas ce qu'on pourrait naïvement croire: on n'étudiait nullement les processus internes au cerveau humain qui sont associés à ce que nous appelons "connaissance". Peut-être était-ce après tout banal: nous n'étudions jamais que des objets ou des propriétés qui sont accessibles à la connaissance humaine: s'il existe des réalités radicalement inaccessibles à notre perception ou à notre connaissance, par définition, nous ne les étudions pas. Mais où réside alors la nouveauté? Parfois, on allait plus loin et on apprenait que la mécanique quantique n'avait fait que justifier un point de vue philosophique antérieur, remontant au moins à Kant, à Hume et à Mach, et développé par les positivistes modernes².

Etrange: voilà une théorie physique qui nous force à adopter une philosophie particulière, sans laquelle on ne peut pas la comprendre³. Une formulation radicale de cette idée est citée par

¹Par exemple, Heisenberg écrit: "La conception de la réalité objective des particules élémentaires s'est donc étrangement dissoute, non pas dans le brouillard d'une nouvelle conception de la réalité obscure ou mal comprise, mais dans la clarté transparente d'une mathématique qui ne représente plus le comportement de la particule élémentaire mais la connaissance que nous en possédons" ({Hei}, p.18). Bohr quant à lui déclarait: "Il n'y a pas de monde quantique. Il y a seulement une description quantique abstraite. Il est erroné de penser que la tâche de la physique est de savoir ce qu'est la Nature. La physique s'occupe de ce que nous pouvons dire sur la Nature"(voir {B}, p.142). Et Peierls ajoute: "Vous voyez, la description de la mécanique quantique se fait en terme de connaissance. Et la connaissance nécessite quelqu'un qui connaît" ({BBC}, p.74). Quand on en vient à la vulgarisation scientifique, on en arrive parfois à ceci: "Les physiciens se demandent si un arbre-ou n'importe quoi d'autre - doit être observé pour pouvoir réellement exister" ({Di}, cité dans {Me1}, p.115). Vu ce que disent les scientifiques, on peut difficilement reprocher à d'autres, par exemple à Claude Levi-Strauss, de tenir les propos suivants: "Jusqu'au dix-neuvième siècle au moins, la chance des sciences "dures" a été que leurs objets furent considérés comme moins complexes que les moyens dont l'esprit dispose pour les étudier. La physique quantique est en train de nous apprendre que cela n'est plus vrai et qu'à cet égard une convergence apparaît entre les différentes sciences (ou prétendues telles). C'est ainsi, me semble-t-il, qu'il faut entendre les propos de Niels Bohr" {LS}.

²Quand j'utilise le terme "positivisme", c'est à cette tradition que je fais référence, et pas à Auguste Comte.

³Ceci contredisait une autre idée, également répandue, selon laquelle la science se passait parfaitement de philosophie.

Mermin ({Me1}, p. 115): "La doctrine selon laquelle le monde est fait d'objets dont l'existence est indépendante de la conscience humaine se trouve être en conflit avec la mécanique quantique et avec des faits établis expérimentalement" ({SA}). Effectivement, la science suppose traditionnellement qu'on peut séparer le "sujet" humain de l'objet étudié. Mais la mécanique quantique avait changé cela: la philosophie "réaliste" (parfois complétée par le mot "métaphysique" ou "naïve") était devenue intenable. Cette philosophie avait eu son heure de gloire au 18ème et au 19ème siècle, à l'apogée du matérialisme scientifique triomphant. Einstein était encore attaché à cette vision des choses. C'est pour cette raison qu'il n'avait jamais pu admettre la mécanique quantique. Mais celle-ci nous était imposée par les faits.

Personnellement, je n'arrivais pas non plus à accepter ce point de vue. Il me semblait qu'il y avait quelque chose de profondément erroné dans l'attitude positiviste, pour des raisons purement philosophiques, et je ne voyais pas comment une théorie scientifique, et encore moins "les faits", pouvaient y changer quelque chose. De plus, je voyais qu'Einstein, Schrödinger et parfois de Broglie, avaient soulevé des objections à l'interprétation dominante de la mécanique quantique. Mais, me disait-on, ils appartenaient à une autre génération, et n'avaient jamais pu admettre la nouvelle vision du monde et de la science élaborée pour nous par Bohr, Heisenberg et Pauli. Néanmoins, toute théorie scientifique est mortelle, semble-t-il, et ne se pourrait-il pas qu'un jour une autre théorie, plus perfectionnée, entraîne une révision de nos conceptions philosophiques? Même cet espoir était vain: von Neumann avait, paraît-il, démontré que toute théorie plus "réaliste" entrerait nécessairement en conflit avec les prédictions expérimentales. C'étaient donc bien les faits eux-mêmes qui imposaient une vision de la science radicalement nouvelle.

Néanmoins Schrödinger, avec son chat, me semblait avoir mis le doigt sur une difficulté conceptuelle fondamentale de la mécanique quantique. Cela me semblait un problème bien plus important que la traditionnelle question du déterminisme, dans laquelle on voulait enfermer les "dissidents". Par contre, je ne voyais pas très bien quel parti tirer des objections d'Einstein: avec Podolsky et Rosen, il avait tenté de montrer que la mécanique quantique était manifestement une description incomplète de la réalité. Mais tout le monde était d'accord pour dire que Bohr avait réfuté de façon magistrale ces objections. Il y avait aussi un certain Bohm qui, à la suite de Louis de Broglie, avait tenté de donner une "interprétation" de la mécanique quantique en termes de "variables cachées". Mais cela aussi avait échoué. De plus, un certain Bell avait montré de façon irréfutable que toute tentative d'interprétation en terme de "variables cachées" devait, sous peine de contredire les prédictions de la mécanique quantique, être non-locale, ce qui était clairement inacceptable.

Ne voyant aucune issue aux problèmes, je me suis occupé d'autres choses, tout en restant insatisfait, comme beaucoup de gens de ma génération. Mais depuis quelques années, il semble y avoir un intérêt renouvelé pour les questions relatives aux fondements de la mécanique quantique. Les différentes versions de ce qu'on a appelé "l'interprétation de Copenhague" semblent faire de moins en moins l'unanimité⁴. Un des buts de cet article est d'expliquer qu'il y a

On pouvait réconcilier les deux assertions en faisant apparaître le positivisme non plus comme une philosophie particulière, mais comme une partie intégrante du discours scientifique.

⁴Bien évidemment, l'immense majorité des physiciens se réclament toujours de cette interprétation. Néanmoins, parmi ceux qui écrivent des livres ou des articles sur la mécanique quantique, il y a un mécontentement croissant. A mon sens, l'oeuvre de Bell ({B}), qui est encore trop méconnue, a joué un grand rôle dans cette lente prise de conscience. A part cet

bien un problème dans la mécanique quantique, comme théorie physique. Le problème est subtil, il est dénué de conséquences pratiques, mais il existe. Il faut néanmoins éviter de donner à ce problème trop d'importance, et en tout cas, ne pas tomber dans la dérive irrationaliste que l'on rencontre parfois dans les marges du discours sur la mécanique quantique. Par ailleurs, je veux montrer que le problème a été historiquement occulté en prétendant que la solution résidait dans l'adoption d'un point de vue philosophique particulier. Je veux également expliquer pourquoi un certain nombre d'idées reçues, comme celles que j'avais acquises lorsque j'étais étudiant (sur le théorème de Bell, sur l'impossibilité des théories de variables cachées), sont erronées.

Je vais commencer par une brève discussion philosophique sur l'opposition entre réalisme et positivisme (section II). Il peut sembler étrange de commencer par une discussion philosophique⁵. Néanmoins, il me semble indispensable de commencer par clarifier ces notions et, en particulier, expliquer ce que le réalisme philosophique n'est pas, tant la confusion sur cette question pervertit toute discussion sur les fondements de la mécanique quantique.

Ensuite, je vais situer quel est exactement le problème de la mécanique quantique (section III), et essayer de montrer que le problème n'est pas lié à une attitude philosophique particulière. De plus, l'idée selon laquelle la solution du problème réside dans l'adoption d'une attitude philosophique positiviste a rendu difficile la compréhension de l'aspect le plus radicalement neuf de la mécanique quantique, à savoir son caractère non-local, mis en évidence par Einstein, Podolski, Rosen et par Bell (section IV). Finalement, je vais brièvement indiquer les solutions possibles existantes (section V). Bien qu'aucune ne soit entièrement satisfaisante, certaines d'entre elles sont bien plus intéressantes que ce qu'on en dit généralement (souvent sans les examiner), et il faut certainement les étudier si l'on veut un jour arriver à une théorie quantique totalement cohérente et dénuée d'ambiguïtés.

Je dois néanmoins souligner que presque rien de ce qui se trouve dans cet article n'est original (sauf, comme on dit d'habitude, les erreurs). En fait, les articles de Bell ([B](#),[Be2](#)) contiennent, mais souvent de façon fort synthétique, presque tout ce qui peut être dit aujourd'hui sur les problèmes de la mécanique quantique. Un des principaux objectifs du présent article est d'encourager le lecteur à étudier les écrits de Bell. Pour faciliter la lecture de l'article, j'ai mis toute la partie de l'exposé qui nécessite des équations dans les appendices 1 à 3, tandis que le dernier appendice est consacré à des pistes bibliographiques.

II. Réalisme et Positivisme

ouvrage fondamental, on peut citer, par exemple, ([Ma](#),[Al](#),[A11](#),[D](#)) comme textes critiquant, au moins implicitement, les dogmes de l'école de Copenhague. Il y a aussi des efforts récents tentant d'améliorer la présentation du point de vue de Copenhague, sans pour autant rompre avec cette tradition ([Gr](#),[O](#),[GMH](#)).

⁵Et contre-productif: les physiciens ont une profonde méfiance, en partie légitime, vis-à-vis des "préjugés" philosophiques. Mais mon but est de montrer que les pires préjugés ne sont pas nécessairement du côté du réalisme. Par ailleurs, n'étant pas philosophe, je suis conscient d'utiliser une terminologie un peu imprécise pour désigner les différents courants de pensée. Ce qui m'intéresse, c'est la façon dont ces courants se reflètent dans l'attitude adoptée par les scientifiques face à leur pratique.

Il est intéressant de remarquer que les solipsistes et les positivistes, quand ils ont des enfants, prennent une assurance-vie.

J.S. Bell

Qu'est-ce que la connaissance scientifique? Il y a, en gros, deux conceptions qui s'affrontent à ce sujet. Pour la première conception, réaliste, nous connaissons, pour l'essentiel, la nature telle qu'elle est. Evidemment, chacun sait que le monde n'est pas nécessairement tel qu'il nous apparaît. Ne pas admettre cela serait faire preuve de réalisme naïf. Remarquons au passage que des gens comme Einstein qui sont souvent accusés d'avoir fait preuve de trop de réalisme nous ont donné une conception du monde assez éloignée des apparences (pensons au paradoxe des jumeaux en relativité!). Le réalisme consiste à penser que nous pouvons élaborer des théories qui nous donnent une connaissance objective du monde au moyen de la confrontation systématique de la théorie et de l'expérience.

Mais on peut prendre une attitude sceptique par rapport à cette première conception. D'où vient-on que nos connaissances se rapportent au monde tel qu'il est? Après tout, tous nos rapports entre notre esprit et le monde passent nécessairement par nos sens. Qui nous dit que ceux-ci ne nous trompent pas? Peut-être sommes-nous pris dans un rêve et rien de ce que nous croyons percevoir n'existe réellement. Toutes les représentations mentales peuvent être des illusions internes à mon esprit. C'est la position solipsiste. Je me demande si quelqu'un a sincèrement cru en cette doctrine, ou si même l'évêque Berkeley ne faisait qu'utiliser cette position comme argument contre le matérialisme. Néanmoins, elle est sûrement irréfutable. Si quelqu'un s'obstine à nier la réalité du monde extérieur à sa conscience, et veut s'obstiner à penser qu'il est un clavecin qui joue tout seul, il n'y a aucun moyen de le convaincre de son erreur.

Une autre position, plus complexe et plus répandue, consiste à admettre l'existence du monde extérieur mais à douter de notre capacité à le connaître objectivement. Ce scepticisme peut prendre différentes formes. En général, on ne doute pas de toutes nos connaissances; mais on peut décider de se limiter aux données immédiates des sens et réduire la science à l'établissement de relations entre ces données. Dans une série d'interviews faites pour la BBC à propos de la mécanique quantique, le journaliste résume bien cette position: "l'idée que le monde 'existe réellement' et que nos théories sont en quelque sorte 'vraies' ou 'fausses' ou sont des approximations de cette réalité, et bien, je pense que cette idée n'est pas très utile". Il répondait à Bell, qui venait de lui dire: "je crois certainement que le monde était là avant moi et qu'il sera là après moi, et je pense que vous en faites partie! Et je crois que la plupart des physiciens prennent ce point de vue quand ils sont coincés par des philosophes." (*{BBC}*, p. 50)⁶. On peut toujours dire que c'est une "croyance" en ce sens qu'il n'y a pas moyen de la démontrer de façon absolue. Mais le fait est que la plupart des scientifiques ont franchi ce Rubicon philosophique et adhèrent à cette croyance. C'est pourquoi le problème de savoir ce qui fonde ultimement cette "croyance" est de préférence laissé aux philosophes.

⁶Bohm est tout aussi catégorique: quand le journaliste lui demande s'il pense que le monde extérieur existe indépendamment de notre existence et de nos observations, il répond: "Tous les physiciens croient cela" (*{BBC}* p. 119).

Non seulement les scientifiques croient à l'existence du monde extérieur, mais ils pensent aussi que l'image que nous en donne la science est globalement correcte. On peut douter d'une théorie particulière concernant l'extinction des dinosaures, mais il y a peu de scientifiques qui douteraient du fait que les propriétés des corps s'expliquent par leur constitution atomique et moléculaire, ou que la théorie de l'évolution rend compte, dans les grandes lignes, de la diversité des espèces. Il faut dire qu'étant donné les immenses succès théoriques de la science il est difficile de la prendre pour la première illusion venue, ou d'en faire principalement une construction sociale. Pour ne donner qu'un exemple, on peut prendre deux montres extrêmement précises et synchronisées et les faire voyager autour de la terre en sens opposé. On constate alors un léger manque de synchronisation, de l'ordre de un mille milliardième de seconde. Néanmoins, ce décalage est mesurable et, ce qui est extraordinaire, c'est qu'il peut être prédit, avec une assez grande précision, au moyen de la théorie de la relativité {Ber}. Si l'on regarde le calcul, on voit qu'il est fait en ignorant totalement le dispositif expérimental utilisé, de sorte qu'il n'y a aucune "tricherie" possible, consistant à ajuster les calculs pour qu'ils s'accordent avec l'expérience. Quand on sait qu'il y a un grand nombre de tels succès, par exemple en physique des hautes énergies, il est difficile de ne pas croire à l'objectivité de nos connaissances scientifiques⁷.

Mais ceci nous éloigne du positivisme. Comment le définir exactement? Si l'on met de côté les positions extrêmes (solipsisme, scepticisme radical) qui sont cohérentes, irréfutables, mais que personne ne soutient vraiment, il n'en existe aucune définition très claire. Il y a un ensemble d'idées qui tentent de mettre l'observation, les mesures, les données immédiates des sens à la base de la démarche scientifique. On cherche à se débarrasser de toute "métaphysique". C'est certainement une réaction saine face à tous les discours a priori sur la "nature des choses". Les expériences constituent bien le seul moyen que nous ayons pour tester nos idées sur la nature. Mais la science ne se limite pas à l'enregistrement de faits. Par ailleurs, on n'arrive pas à reconstruire l'ensemble du discours scientifique en partant uniquement des données immédiates des sens⁸. Heisenberg raconte comment Einstein lui expliquait cela: "Il (Einstein) pensait que toute théorie contenait en fait des quantités inobservables. Le principe selon lequel on ne doit faire appel qu'à des quantités observables ne peut pas être mené à bien d'une façon consistante. Et quand je lui objectais que je faisais seulement appel au genre de philosophie que lui-même avait mis à la base de la théorie de la relativité, il me répondit simplement: "Peut-être ai-je utilisé, même par écrit, une telle philosophie antérieurement, mais c'est néanmoins un non-sens" (cité dans {We}, chapitre 7).

Pour préciser un peu plus la différence entre réalisme et positivisme, prenons un exemple: lorsqu'on dit que les dinosaures ont existé on veut dire exactement ce que cela veut dire: il y a x millions d'années, la terre était peuplée d'animaux ressemblant approximativement à ces gentilles bestioles qui envahissent nos écrans. Il est important de bien comprendre la distinction, qui est particulièrement claire quand on parle de la préhistoire, entre la signification d'une assertion (qui se rapporte ici à ce que le monde est, ou était, réellement) et les méthodes utilisées pour en vérifier la validité. Après tout, nous n'avons accès qu'à des squelettes de dinosaures pour les

⁷Voir l'excellent livre de Weinberg {We} pour une critique du relativisme historico-sociologique et du positivisme.

⁸La prise de conscience de cette situation est sans doute responsable du fait qu'en philosophie le positivisme semble être passé de mode.

étudier. Il nous est radicalement impossible de retourner en arrière pour "aller voir" ce qui se passait réellement à l'époque. Toutes, absolument toutes les assertions se rapportant à cette époque, ou au passé en général, sont des "théories" qui transcendent les données immédiates des sens. Celles-ci ne nous donnent même pas "des os de dinosaures". Elles nous donnent des objets que nous interprétons comme étant des os de créatures ayant vécu il y a x millions d'années. C'est déjà une théorie que de dire que ce sont des os de dinosaures. Néanmoins, c'est bien cela que nous voulons dire quand nous en parlons.

Un autre problème fondamental rencontré par les positivistes est qu'il n'est pas possible de définir précisément ce que sont les données immédiates des sens. A partir de quand considère-t-on qu'on a affaire à une théorie par opposition à une observation pure? Même lorsqu'on prend les objets de la vie courante, on doit considérer qu'on a une "théorie" (spontanée, implicite) sur le monde. Dire qu'une table est là, si on la voit, c'est faire l'hypothèse théorique que ce qui est la cause (au moins en partie) de notre "sensation" (la vue de la table) c'est précisément qu'il existe une table, là, en dehors de moi et de ma conscience. Pour les dinosaures, c'est bien pire: l'idée même d'une préhistoire est théorique, évidemment (pourquoi le monde n'a-t-il pas été créé récemment, avec tous les vestiges déjà là?), et toutes les assertions faites à ce sujet sont des "théories" où se mêlent "perceptions" ou "observations" et "hypothèses".

Ou, comme le dit Bell: "le problème de la mesure et de l'observateur est de savoir où l'un et l'autre commencent et finissent. Prenez mes lunettes par exemple: si je les enlève, à quelle distance dois-je les mettre pour qu'elles fassent partie de l'objet plutôt que de l'observateur? Il y a de tels problèmes depuis la rétine jusqu'au nerf optique et au cerveau. Je pense que, quand on analyse ce langage dans lequel les physiciens sont tombés, à savoir que la physique concerne les résultats d'observations, vous voyez qu'à l'analyse tout cela s'évapore et que rien de très clair n'est dit." ({BBC} p. 48)

Néanmoins, il faut bien souligner ce que le réalisme n'est pas: il n'affirme pas que la vérité est "absolue" en ce sens qu'elle aurait un fondement absolu (on ne peut pas réfuter le solipsisme, ni le scepticisme), ou qu'on obtiendrait nécessairement, ultimement, une théorie parfaite. Il n'affirme pas non plus que tous les concepts introduits dans la théorie doivent nécessairement correspondre à quelque chose de réel. Mais il pose la question "Qu'est-ce qui existe réellement?" Au siècle passé, la question était: les atomes sont-ils vraiment là? Ou sont-ils seulement une façon commode de décrire le monde? On peut poser le même genre de questions pour les gènes et pour d'autres quantités qui ne sont pas nécessairement "observables" au moment où elles sont introduites. Mais poser ce genre de questions, demander à la physique de définir l'ontologie, fait progresser la recherche tandis que déclarer à priori que ce sont des questions "métaphysiques" (la position de Mach concernant les atomes) ne fait que la bloquer⁹. Le réalisme ne consiste pas non plus à croire qu'il est impossible que l'esprit humain rencontre un jour des difficultés insurmontables dans son effort pour comprendre objectivement le monde. Après tout, le cerveau humain est le produit d'une évolution au cours de laquelle la capacité génétique de comprendre scientifiquement le monde procurait un avantage sélectif plutôt limité. L'essentiel pour un réaliste est que la véracité de nos théories dépend principalement, non pas de ce qui se passe dans nos têtes, mais de ce que le monde est. Qu'une connaissance partielle mais objective du monde est possible, et que le but de la science est de se rapprocher sans cesse d'une telle connaissance.

⁹Un autre exemple, lié à la mécanique quantique, concerne le théorème de Bell (cf sections 4 et 6).

III. Le problème de la mécanique quantique

Pour comprendre le problème, il faut d'abord bien prendre la mesure de l'ambition de la physique. Cette ambition a été remarquablement bien décrite par Laplace: "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." Ce qu'il faut retenir de ce texte, ce n'est pas tant l'idée du déterminisme universel que celle du réductionnisme universel¹⁰. Le but est d'avoir une vision du monde et de ses lois qui est en principe complète. C'est-à-dire qui en principe rend compte de tous les phénomènes observés. Evidemment, l'important est ce qu'on entend par "en principe". Personne n'a jamais pensé écrire les équations qui gouvernent l'univers et en déduire tous les phénomènes observés. Pour expliquer ceux-ci, on devra toujours faire appel à des hypothèses particulières pour des aspects donnés de la réalité. Mais on ne peut pas s'empêcher de se poser la question: manque-t-il quelque chose à nos lois, auquel cas il n'y a aucune raison de ne pas poursuivre la recherche, ou bien sont-elles complètes?¹¹ Exemple: dans la physique classique, on ne peut pas tout ramener aux lois de la mécanique; il faut au minimum introduire les lois de l'électromagnétisme. Autre exemple: le débat sur le vitalisme au siècle passé, qui a abouti à la conclusion que la "vie" est bel et bien réductible à la physico-chimie. Dans son livre sur l'ordinateur, l'esprit et les lois de la physique {Pe}, Penrose se demande si ces lois peuvent, en principe, rendre compte du fonctionnement de l'esprit humain. Quelle que soit l'opinion qu'on ait sur sa réponse, il est clair que la question est importante.

Ce point de vue réductionniste est aussi un point de vue unificateur, et s'oppose à l'atomisation de la science. La science n'est pas une longue suite de "modèles" (physiques, chimiques, biologiques, etc.) sans lien entre eux et plus ou moins bien "vérifiés expérimentalement". Chaque "modèle" doit être, si possible, ramené à des lois plus fondamentales.

Dans la physique classique, on pensait avoir une description complète du monde: on pouvait penser qu'il "suffisait" de se donner les positions et les vitesses de toutes les particules constituant l'univers ainsi que les forces agissant entre elles; pour être plus précis, on devait aussi introduire la configuration des champs électromagnétiques et gravitationnels. Pour que ceci soit une théorie de "tout" il faut que ces données déterminent les valeurs des positions et des vitesses des particules, au moyen de lois (qui ici sont déterministes, mais qui pourraient être stochastiques) pour tous les temps ultérieurs. La mécanique quantique bouleverse ce schéma, mais offre-t-elle une alternative, une autre théorie, en principe, de "tout"? Si l'on ne pose pas la question en ces termes, on ne peut même pas formuler les problèmes rencontrés en mécanique quantique. En

¹⁰Dans son dernier livre {We}, Weinberg illustre et défend remarquablement bien une version moderne du réductionnisme.

¹¹Feynman posait la question "Est-ce que l'équation de Schrödinger contient les grenouilles, les compositeurs musicaux ou la morale?" {Fe1}

effet, on pourrait considérer cette théorie comme un "modèle" décrivant certains constituants élémentaires de la matière, dans certaines situations expérimentales, et, considérée sous cet angle, la théorie est irréfutable. Par exemple, dans cette perspective, on peut postuler que la mécanique quantique ne s'applique pas à des agrégats suffisamment compliqués d'atomes tels que les appareils de mesures, et toutes les difficultés disparaissent.

En principe, la mécanique quantique introduit un objet censé remplacer les positions et les vitesses des particules, à savoir la fonction d'onde du système. Mais la donnée de la fonction d'onde du système détermine-t-elle la valeur de celle-ci en des temps ultérieurs? La réponse à cette question est un peu compliquée. Si l'on s'en tient aux principes appliqués en pratique en mécanique quantique (pour obtenir ce remarquable accord avec l'expérience), la réponse est non. En effet, d'une part la fonction d'onde évolue selon l'équation de Schrödinger, qui la détermine bien en des temps ultérieurs. Néanmoins, et c'est ici qu'apparaît la difficulté, lorsqu'on fait une "mesure", on est obligé de "réduire" la fonction d'onde c'est-à-dire de lui faire suivre une "loi" d'évolution différente de celle donnée par l'équation de Schrödinger (voir Appendice 1 pour une formulation mathématique du problème). Si l'on ne fait pas cela, les prédictions ultérieures ne seront pas en accord avec l'expérience. Pour reprendre la notation de Penrose $\{Pe\}$, qui explique bien ce curieux dualisme, appelons U la loi correspondant à l'équation de Schrödinger, et R la réduction. Mais la réduction n'est pas une opération qui est déterminée en quoi que ce soit par les données qui caractérisent le système avant la mesure, c'est-à-dire par sa fonction d'onde. C'est d'ailleurs pour cela que la mécanique quantique est une théorie essentiellement probabiliste. La fonction d'onde, obtenue comme solution de l'équation de Schrödinger, avant la mesure, permet de calculer la probabilité des différents résultats auxquels la réduction mène après la mesure. Mais ce résultat lui-même est déterminé uniquement par l'observation.

On pense souvent que c'est le caractère essentiellement aléatoire de la mécanique quantique qui suscite l'hostilité de la plupart des critiques, notamment d'Einstein. Il est vrai qu'il a déclaré que Dieu ne jouait pas aux dés avec l'Univers, mais il est aussi clair que son opposition à la mécanique quantique ne venait pas essentiellement de cet aspect irréductiblement probabiliste. Pour commencer, il faut bien comprendre la différence entre la probabilité quantique et classique, du moins dans l'interprétation habituelle. Prenons un dé: on peut le lancer et, tant qu'on ne regarde pas sur quelle face il est tombé, on peut décrire celle-ci au moyen d'une distribution de probabilité, à savoir une chance sur six pour chaque face, si du moins le dé n'est pas pipé. Néanmoins, il existe une face sur laquelle le dé est tombé. Personne ne dira que cette distribution de probabilité est la description physique complète du dé avant qu'on ne le regarde. Dans ce cas-là, il n'y a aucune difficulté pour admettre une différence entre la connaissance que nous avons à un moment donné, et la situation réelle. Mais en mécanique quantique ordinaire, l'idée fondamentale est qu'il n'existe pas de valeur déterminée de quoi que ce soit avant la mesure ou l'observation. Il existe une fonction d'onde et rien d'autre. Cette fonction d'onde ne donne la probabilité de rien d'autre que des résultats possibles de mesure¹². Et donc de rien d'autre que de la fonction d'onde qui sera produite, après la mesure, par l'opération R . Donc, l'opération R ne révèle pas une valeur (de la mesure) préexistante et peut-être inconnue, elle la crée.

Le problème peut maintenant se résumer ainsi: qu'est-ce qui distingue les situations physiques où

¹²En d'autres termes, on n'a pas affaire à une probabilité d'être quelque chose mais d'être mesuré.

l'on doit utiliser l'opération U de celles où l'on doit utiliser R? En effet, qu'est-ce qui définit physiquement une mesure? De tels processus se produisent-ils uniquement dans le laboratoire ou peuvent-ils avoir lieu, spontanément, dans la nature? Comme le dit Bell, fallait-il attendre qu'il y ait des êtres humains sur terre pour que l'opération R apparaisse? Ou fallait-il attendre qu'il y ait des gens munis d'un doctorat? {Be2} Evidemment, il est clair que, d'un point de vue pratique, on sait ce qu'est une mesure. Mais la situation est clairement insatisfaisante si l'on veut considérer la mécanique quantique, en principe, comme une "théorie de tout". Tout le problème est là, mais c'est le seul problème. Il n'est pas facile à résoudre, mais il faut souligner qu'on a parfaitement le droit de le considérer comme peu important par rapport aux immenses succès de la théorie quantique, et qu'il ne justifie nullement les énoncés excessifs sur la "disparition du réel" que l'on rencontre parfois¹³.

Une première attitude possible consiste à donner un sens purement subjectif à la fonction d'onde et par conséquent à l'opération R. La fonction d'onde représente la connaissance que nous avons du système. Il n'est donc pas étonnant que cette fonction change abruptement lorsqu'on effectue une mesure. On apprend quelque chose de plus sur le système (c'est une interprétation possible des phrases citées dans la note 1). Mais cette vision pose beaucoup de problèmes: d'une part, d'après l'interprétation orthodoxe, on n'apprend pas vraiment quelque chose sur le système, on le modifie, ou on lui impose une propriété qu'il ne possédait pas avant. D'autre part, dans ce point de vue subjectif, doit-on considérer que chaque expérimentateur, et potentiellement chaque individu, possède "sa" fonction d'onde qui est simplement un résumé de toutes ses "observations" passées? Probablement que personne n'irait jusque là¹⁴.

On peut tenter de donner un sens plus objectif à l'opération R en essayant de la mettre en relation avec l'appareil de mesure: après tout, il n'est pas étonnant, a priori, qu'un appareil de mesure, par définition macroscopique, perturbe considérablement un système composé d'un atome ou d'un électron. On pourrait tenter de décrire l'ensemble composé du système mesuré et de l'appareil de mesure en suivant strictement l'équation de Schrödinger, appliquée à la fonction d'onde de l'ensemble, et espérer que l'opération R apparaisse comme une description approximative de l'effet de cela sur le système mesuré. Malheureusement, on peut montrer que cet espoir n'est possible qu'à condition de changer l'équation de Schrödinger: celle-ci étant linéaire et déterministe, tout ce que le couplage entre l'appareil de mesure et l'objet mesuré peut produire, c'est une fonction d'onde qui est une superposition de différents états macroscopiques (cfr Appendice 1). C'est ce que Schrödinger a voulu illustrer avec son chat. Toute tentative d'éliminer R revient soit à changer la théorie, soit à admettre son caractère incomplet.

Envisageons maintenant l'ensemble d'idées qu'on associe à l'interprétation de Copenhague. Il faut

¹³Encore quelques exemples, pris dans des ouvrages de vulgarisation: "Il n'est rien de réel, nous dit la mécanique quantique et nous ne pouvons faire aucun commentaire sur des événements qui se produisent lorsque nous ne les observons pas" ({Gri} Couverture). Ou encore: "Enfin une sorte de nouvelle religion, que nous avons appelée "syncrétisme quantique", est en train de naître, qui rapporte tout - matière et esprit - à un absolu inconnaissable mais dont l'existence pourrait être déduite des aspects extraordinaires de la nouvelle physique." ({OP} p.159). Peut-être, mais c'est aller un peu vite en besogne!

¹⁴Donner un sens purement statistique à la fonction d'onde pose le même genre de problèmes: dans les deux approches, on admet implicitement que la description quantique, ainsi interprétée, n'est pas complète. Peut-être pense-t-on qu'une description complète est impossible, mais il faut justifier cette conviction.

bien distinguer entre l'algorithme pratique qu'on utilise en mécanique quantique (décrit dans l'appendice 1) et la théorie qui tente de le justifier. Personne ne conteste l'algorithme, en pratique, et ne songe à le modifier (en tout cas pas les auteurs des différentes solutions proposées dans la section V). Une première justification introduite par l'école de Copenhague consiste à considérer l'appareil de mesure comme radicalement classique. On pourrait accepter cette position comme provisoire (on ne peut pas faire mieux pour le moment) mais ce n'était pas, semble-t-il, l'idée de Bohr.

Ce qui est gênant dans ce point de vue, c'est justement le succès de la mécanique quantique: comment se fait-il qu'on ait une théorie qui marche tellement bien, en ce sens qu'aucune de ses prédictions n'a jamais été mise en défaut, depuis les atomes jusqu'aux étoiles, mais qu'il faille néanmoins restreindre son champ d'application, pour des raisons purement conceptuelles? Pourquoi les appareils de mesure échapperaient-ils aux lois de la physique?

C'est à partir d'ici que les "solutions" philosophiques s'introduisent. Au lieu d'admettre qu'il y a un problème quand on analyse le processus de mesure, on introduit "l'observateur". Celui-ci est "classique" mais il est surtout complètement extérieur aux équations de la théorie. Son seul rôle est de réduire la fonction d'onde. On tente alors de justifier cette "solution" en parlant de la "connaissance que nous avons du système" mais sans vouloir donner un sens purement subjectif à la fonction d'onde (voir {Me1}, p.187 pour une bonne illustration de ce genre d'ambiguïté).

Une deuxième "solution" vague est la "complémentarité". Certaines propriétés sont "incompatibles". Outre que cela ne résout pas le problème de la mesure, c'est encore une façon d'ajouter à la théorie quelque chose qui ne se trouve nullement dans ses équations¹⁵.

Une autre façon philosophique d'esquiver le problème est de déclarer que le seul but de la science est de prédire les résultats de mesure. Clairement, le problème que nous avons rencontré disparaît. Si les prédictions sont correctes, peu importe la cohérence interne de la démarche. Mais comment peut-on prendre cette attitude vraiment au sérieux? C'est confondre la fin et les moyens¹⁶. Comme on l'a vu dans la section II, dans toute la démarche scientifique on utilise les expériences pour tester nos connaissances, mais le but n'est pas de simplement prédire les résultats d'expériences "pour le plaisir".

Ce qui est dommage avec toutes ces "solutions", c'est qu'elles permettent d'éviter de donner un statut physique précis à la fonction d'onde: rôle subjectif? Objectif? Amplitude de probabilité? Objet réel? Ces ambiguïtés ont aussi occulté pendant longtemps le problème de la non-localité quantique que nous allons envisager maintenant.

¹⁵Chez Bohr, la complémentarité était supposée s'appliquer à toutes les disciplines, biologie, psychologie, etc... Avec parfois les accents vitalistes: "Seul le renoncement à une explication de la vie, au sens ordinaire du mot, nous donne la possibilité de tenir compte de ses caractéristiques" ({Bo4}, p.124).

¹⁶Bohm: Si le seul but de la physique est d'expliquer les expériences, je pense que la physique aurait été bien moins intéressante qu'elle ne l'a été. Je veux dire, pourquoi voulez-vous expliquer les expériences? Cela vous amuse ou quoi?({BBC} p. 124). Bell: L'expérience est un moyen. Le but reste de comprendre le monde. Restreindre la mécanique quantique exclusivement à des opérations en laboratoire revient à trahir l'entreprise scientifique ({Be2}).

IV. 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 l'article a été présenté par ses auteurs comme étant seulement une critique de l'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique.

Ce n'est qu'en 1964 que John Bell a montré que la seule conclusion possible de l'analyse d'Einstein, Podolski et Rosen est que le monde est non local. Afin de comprendre précisément ce que cela veut dire, voyons d'abord l'argument d'Einstein, Podolski et Rosen. On construit une source qui envoie les particules dans des directions opposées, disons vers la gauche et vers la droite, et ces particules se trouvent dans un certain état quantique. On place des instruments de mesure, un pour chaque particule. Ces instruments peuvent, en principe, être placés arbitrairement loin l'un de l'autre¹⁷. Ces appareils peuvent chacun se trouver dans trois positions (1, 2 ou 3) et le résultat de la mesure est de type binaire: nous le noterons "oui" ou "non". Le résultat d'une expérience peut donc être mis sous la forme, par exemple (1, oui, 2, non) c'est-à-dire que l'appareil de gauche est dans la position 1 et le résultat est "oui" tandis que celui de droite est dans la position 2 et le résultat est "non".

Einstein, Podolsky et Rosen sont partis du fait que l'état quantique prédit une corrélation parfaite quand les appareils, à gauche et à droite, sont dans la même position: s'ils sont tous deux sur 1 (ou 2, ou 3) les réponses seront toutes deux "oui" ou toutes deux "non"¹⁸. Mais l'état quantique des particules ne nous dit pas si le résultat sera "oui" ou "non". En langage imagé, chacune des particules n'est ni prête à dire "oui" ni prête à dire "non", quelle que soit la direction dans laquelle on "l'interroge".

Bon, mettons maintenant qu'on ne fasse d'abord qu'une mesure à gauche en retardant la mesure à droite (on recule un peu l'appareil de mesure). Immédiatement après la mesure à gauche, on est sûr du résultat à droite (oui si le résultat à gauche est oui, non si le résultat à gauche est non). En effectuant la mesure à gauche, a-t-on changé l'état physique du système à droite¹⁹? Si l'on s'en tient à la description qui vient d'être donnée, la réponse est oui: avant la mesure (à gauche), le

¹⁷Pour que ce qui suit reste valable, il faut que les particules soient isolées du reste du monde avant d'interagir avec l'appareil de mesure, ce qui en pratique semble impossible pour de très grandes distances. Dans les expériences, les distances sont de l'ordre de quelques mètres. Néanmoins, le phénomène est tellement extraordinaire que le fait qu'en principe la distance entre appareils de mesure puisse être aussi grande qu'on veut mérite d'être souligné.

¹⁸Chaque "réponse" apparaissant avec une fréquence 1/2 lorsqu'on répète l'expérience un grand nombre de fois.

¹⁹Dans le formalisme habituel ce qui se passe c'est simplement que la mesure à gauche réduit la fonction d'onde mais, vu sa forme, la réduction opère aussi à droite (cfr appendice 2). Evidemment, l'importance que l'on attache à ce fait, quand il est exprimé dans le formalisme de la mécanique quantique, renvoie au statut que l'on accorde à la fonction d'onde et à sa réduction. C'est pourquoi il vaut mieux discuter la non-localité directement, sans passer par le formalisme de la mécanique quantique, pour éviter de mêler ce problème avec celui des interprétations. De plus, on montre ainsi que la non-localité est une propriété de la nature établie à partir d'expériences et de raisonnements élémentaires, indépendamment de l'interprétation qu'on donne au formalisme quantique. Par conséquent, toute théorie ultérieure qui pourrait remplacer la mécanique quantique devra également être non-locale.

système était radicalement indéterminé (des deux côtés) et, après la mesure (à gauche) il est déterminé (à gauche *et* à droite), en ce sens que la mesure ultérieure (à droite) a maintenant un résultat bien déterminé. Il semble donc qu'on a affaire à une forme d'action à distance, peut-être subtile mais une action quand même²⁰.

Néanmoins, il y a un trou béant dans cet argument: qu'est-ce qui nous dit que lorsque nous effectuons la mesure à gauche nous ne découvrons pas une propriété intrinsèque de la particule (exprimée sous la forme de la "réponse" oui/non) qui serait simplement la même pour la particule envoyée à droite ? Bien sûr, le formalisme quantique ne parle pas de telles propriétés (les particules ne disent ni oui ni non avant d'être mesurées) mais pourquoi ce formalisme est-il le dernier mot de l'histoire ? Avant d'admettre une conclusion aussi radicale que la non-localité, il faudrait peut-être envisager toutes les autres possibilités. Par exemple, comme les particules proviennent d'une source commune, il se peut très bien, a priori, qu'elles emportent avec elles des "instructions" qui spécifient comment répondre aux différentes questions²¹. Et, alors, il n'y a plus aucun mystère ni action à distance dans le fait que leurs réponses soient les mêmes. Et pour Einstein, Podolski et Rosen, c'était bien la conclusion qui s'imposait: la non-localité étant impensable, ils pensaient avoir démontré que la mécanique quantique était "incomplète". Il faut bien préciser le sens de ce mot. Cela ne veut pas dire que ces "instructions", ou "variables cachées" comme on les appelle, c'est-à-dire n'importe quoi qui n'est pas la fonction d'onde, soient accessibles à notre connaissance, que nous puissions les manipuler, les prédire etc. C'est simplement qu'elles existent. Qu'il y ait quelque chose dans le monde, quelque mécanisme, déterministe, probabiliste peu importe, qui explique comment la source donne ces "instructions" aux particules. Si le lecteur pense que parler de la simple existence de quelque chose (les "instructions") qui puisse être radicalement inconnaisable, incontrôlable, imprédictible, avant la mesure c'est faire de la métaphysique, tant mieux, parce que c'en est, mais de la métaphysique expérimentale.

En effet, et c'est là la contribution géniale de Bell, il y a moyen de tester si ce quelque chose qui manquerait à la mécanique quantique et qui sauverait la localité existe. Mais avant d'arriver à Bell, résumons ce qu'ont montré Einstein, Podolski et Rosen: ou bien le monde est non-local en ce sens qu'effectuer une mesure à gauche a un effet à droite, ou bien la mécanique quantique est incomplète. Cette conclusion-là est inévitable si on analyse l'expérience EPR.

La seule erreur d'Einstein, Podolski et Rosen a été d'en conclure un peu vite que la mécanique quantique devait être incomplète. Cette erreur a été la source de beaucoup de confusion. En particulier la réponse de Bohr à l'article EPR est, soit incompréhensible, soit met en question

²⁰Il est difficile d'exprimer combien cette notion d'action à distance fait horreur à certains physiciens: Newton 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" (cité dans {He}, 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" ({Bor}, cité dans {Me1}, p.121).

²¹Le mot "instructions" est dû à Mermin{Me2}. Mais peu importe le terme, il désigne n'importe quoi qui permette d'expliquer comment le fait que les particules proviennent d'une source commune peut rendre compte, de façon purement locale, des corrélations parfaites.

justement l'hypothèse de localité avancée par Einstein, Podolski et Rosen (voir l'analyse de Bell dans l'Appendice 1 de {BS}). Mais, en général, on oublie beaucoup trop vite que, si l'on formule les conclusions d'Einstein, Podolski et Rosen sous forme d'une alternative, comme ci-dessus, elles sont absolument correctes: il n'y a aucun moyen de rendre compte de cette parfaite corrélation si on ne suppose pas, soit une influence de la mesure à gauche sur l'état du système à droite, soit que la fonction d'onde ne décrit pas complètement le système.

En fait, il y a une interprétation de la mécanique quantique qui est parfaitement compatible avec la deuxième possibilité²². On donne à la fonction d'onde un statut principalement épistémique. Elle représente tout ce que nous pouvons connaître, à jamais, sur le système. Ceci n'empêche nullement qu'il existe des variables "cachées" qui déterminent, pour chaque particule le résultat de la mesure: pour chaque position 1, 2 ou 3, une particule donnée répondra oui ou non et cette réponse est la même à gauche et à droite parce qu'elles viennent de la même source. Mais comme nous n'avons pas accès à ces réponses avant de les mesurer et que l'état initial est tel que les réponses sont, une fois sur deux, oui et une fois sur deux non, on a l'illusion d'une action à distance.

Maintenant, venons-en à Bell. Tout ce que Bell montre c'est que de telles variables cachées qui sauveraient la localité n'existent simplement pas. Comment peut-on tester une idée apparemment aussi "métaphysique" ? On regarde ce qui se passe quand les détecteurs ne sont pas alignés. Alors, on n'a plus de corrélation parfaite mais on a certains résultats statistiques²³, également prédits par la mécanique quantique, et qui sont incompatibles avec la simple existence d'instructions expliquant la corrélation parfaite (voir Appendice 2). Il faut souligner qu'ici on a affaire à un résultat purement mathématique. De plus, comme ces prédictions de la mécanique quantique ont été vérifiées expérimentalement {As}, on peut faire le raisonnement en se passant de la théorie et en concluant que la non-localité est déduite directement de l'expérience via le raisonnement d'EPR-Bell. Mais il ne faut pas oublier la partie EPR de l'argument. Sinon, on en conclut que Bell a simplement montré l'inexistence de certaines variables cachées, comme on l'avait toujours pensé de toutes façons et que "Bohr gagne à nouveau" {BS}²⁴. Mais ce n'est pas du tout de cela qu'il s'agit. L'inexistence de ces variables cachées implique que le monde est non-local puisque ces variables étaient la seule "porte de sortie" au vu de l'argument EPR. Et c'est cela qui est réellement surprenant dans le résultat de Bell. Voici ce qu'il en dit lui-même: "Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées

²²Cette interprétation "subjective", mentionnée dans la section 3, est souvent admise implicitement par ceux qui pratiquent la mécanique quantique. Ce qui explique aussi pourquoi la situation EPR ne leur paraît pas choquante à première vue.

²³Il existe une variante de l'argument de Bell {GHZ}, avec trois particules, et dans laquelle on n'a pas besoin de statistique: un seul événement suffit pour montrer l'inexistence de ces "instructions". Mais, dans ce cas, l'expérience n'a pas été faite.

²⁴Bell 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)) 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 parlait de variables cachées déterministes" ({BS}, p.157). Remarquons au passage que des variables cachées indéterministes ne feraient que compliquer la tâche des particules devant répondre *de la même façon* des deux côtés. Pour une discussion plus détaillée, voir {Ma}.

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 simplement ne marche pas". ({Be}, 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" ({BS}, p. 150) n'est devenu clair qu'avec le résultat de Bell.

Voyons plus en détail ce que la non-localité est réellement. Pour cela, je vais donner d'abord deux exemples de ce qu'elle n'est pas. Premièrement, il y a l'exemple donné par Bell des chaussettes de Mr Bertlmann {BS}. Pour illustrer la même idée, 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 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. 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.

Prenons un autre exemple, radicalement différent. Imaginons un sorcier ou un magicien qui agit à distance: en manipulant une effigie il influence l'état de santé de la personne représentée par celle-ci.²⁵ 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;
- 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

²⁵Voir, par exemple, les ouvrages bien connus de mécanique quantique "Les sept boules de cristal" et "Le temple du soleil", Hergé, éd. Casterman. Il est inutile de dire, mais cela va encore mieux en le disant, que je ne pense nullement que la non-localité exhibée par la physique quantique ait quoi que ce soit à voir avec la magie, la parapsychologie, le "New Age", les médecines "holistes" et autres plaisanteries du même genre. Malheureusement, ce n'est pas toujours bien compris. Pour ne donner qu'un exemple, dans un magasin "health food" à New York on trouve une publicité pour un "programme de purification spirituelle" comprenant "une initiation à la Dynamique Quantique". Celle-ci permettrait de "dissoudre le Karma de la vie passée" ({Be} p.6). Pour une bonne critique des pseudo-sciences, voir {Br}, et surtout {Ga} sur l'usage abusif de l'expérience EPR par des parapsychologues.

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 physique²⁶. Finalement, cette action semble instantanée, en tout cas elle se propage plus vite que la vitesse de la lumière $\{As\}$. 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". 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 $\{He\}$, $\{Ma\}$ 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 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. La notion de cause est compliquée à analyser mais comme le fait remarquer Maudlin $\{Ma\}$, 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 (voir $\{Ma\}$, $\{Ma1\}$ pour une discussion de la notion de cause en relation avec la situation EPR). La notion de signal est trop anthropocentrique pour que la notion de cause puisse lui être réduite.

Quelles sont les réactions des physiciens face au théorème de Bell? Le 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" $\{St1\}$ et un physicien de Princeton déclare "celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête" $\{Me2\}$. Mais l'indifférence est néanmoins la réaction la plus répandue. Mermin distingue différents types de physiciens $\{Me2\}$: 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 reviennent toujours, du moins d'après mon expérience personnelle, à une des deux positions suivantes: soit on déclare 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

²⁶Pourvu 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.

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" {Bor}. 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" {BS}²⁷. L'idée de Born, quand on la rend précise, mène justement aux "variables cachées" dont Bell montre que la simple existence est impossible.

La deuxième réponse revient à dire que la mécanique quantique explique le phénomène et qu'elle est complète et locale. D'abord, comme le dit Bell "la mécanique quantique n'explique pas vraiment; en fait, les pères fondateurs de la mécanique quantique se flattaient plutôt de renoncer à l'idée d'explication" ({BBC}, p.51). Evidemment, la mécanique quantique prédit les corrélations parfaites et imparfaites qui interviennent dans le raisonnement EPR-Bell. Mais est-ce que prédire = expliquer? A mon sens, c'est de nouveau tomber dans une confusion philosophique que d'identifier ces deux notions. Même si la notion d'explication est notoirement difficile à expliciter, chacun en possède une idée intuitive suffisante pour saisir la distinction: imaginons un vrai magicien agissant vraiment à distance, d'une façon qui défierait toutes les lois de la physique, mais qui pourrait parfaitement prédire quand ses pouvoirs agissent. Personne ne prendrait cette prédiction pour une explication.

Néanmoins, on peut donner une explication du phénomène EPR-Bell dans le cadre de la mécanique quantique (voir Appendice 2) (dans la situation envisagée par Einstein, Podolski et Rosen). On prend la mécanique quantique au sérieux (c'est-à-dire en donnant à la fonction d'onde un statut physique et pas épistémique et en prenant l'opération R comme réelle) et elle est manifestement non-locale (du moins R l'est dans l'expérience EPR).

Toute cette discussion montre que l'ambiguïté sur le statut de la fonction d'onde (moyen de calcul, objet réel?) entretenue par la tradition positiviste a rendu difficile la compréhension de la non-localité. Si la fonction d'onde est purement épistémique, que les opérations faites sur elle soient "non-locales" n'est évidemment pas un problème. Mais si elle n'est pas réelle, qu'est-ce qui est réel? Quelle que soit la réponse, on n'échappe pas à la non-localité; celle-ci est manifeste si la fonction d'onde est réelle et elle est une conséquence du raisonnement EPR-Bell si la fonction d'onde est épistémique.

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 que je ne vais pas développer (voir {Ma} 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 !" {Pe}. Mais comme l'inégalité de Bell est interprétée en général de façon incorrecte, le problème du conflit (subtil mais réel) non-localité/relativité n'apparaît même pas. Néanmoins, il faut souligner que la simple existence d'une théorie

²⁷Et Bell ajoute "Ceci illustre 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."

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, l'opération R 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. On peut dire que tout ou presque a été essayé (voir par exemple {Me3} ou {Cu} pour différentes tentatives et Maudlin {Ma} pour une discussion critique).

Dans {BS}, Bell conclut qu'il y a quatre possibilités:

1) que les expériences donnent tort à la mécanique quantique. Mais les résultats ne vont pas du tout dans ce sens.

2) Admettre la non-localité.

3) Considérer que la position des appareils de mesure n'est pas réellement indépendante des particules. En clair, cela revient à dire que les particules emportent avec elles des instructions mais pas pour toutes les questions à la fois. Seulement pour celle que l'on va poser. Mais comment le savent-elles ? La réponse tient dans ce qu'on appelle parfois le "super-déterminisme": la liberté des expérimentateurs qui croient pouvoir orienter les détecteurs à leur guise est une illusion. Non seulement le libre-arbitre est une illusion (là n'est pas le problème), mais l'orientation des détecteurs qui peut aussi être déterminée par les résultats de deux loteries "indépendantes" est subtilement corrélée avec l'état des particules envoyées. Comme "tout", expérimentateurs, particules, loteries, etc., vient d'une origine commune (le "Big Bang"), en principe cette position est tenable bien qu'au moins aussi étrange que la non-localité. De plus, si on y réfléchit, ce genre d'explication peut être invoqué comme substitut à n'importe quelle théorie physique. Si une loi ne me plaît pas, je peux toujours déclarer qu'une autre loi est valable, mais qu'il y a une conspiration dans les conditions initiales de l'univers qui m'induit en erreur (systématiquement). Remarquons en passant que ce super-déterminisme est suggéré comme alternative aux problèmes posés par une théorie (la mécanique quantique) qui était supposée introduire un indéterminisme radical dans les lois de la nature; cette ironie devrait donner à réfléchir à tous ceux qui proclament régulièrement la mort du déterminisme.

4) Il n'y a aucune réalité en dessous d'un niveau "classique" "macroscopique". A mon sens, Bell commet là une erreur. Tout le problème vient de corrélations entre résultats de mesures (faites par des appareils, par définition, macroscopiques). Au départ, on ne suppose ni l'existence de particules, ni de photons, ni d'aucun de leurs attributs. Tout le problème vient de ce que les corrélations (macroscopiques) n'admettent aucune explication locale.

Il est intéressant de remarquer que Feynman {Fe}, lorsqu'il discute l'inégalité de Bell, suggère deux possibilités: soit le futur influence le passé (ce qui, dans une théorie relativiste, est essentiellement équivalent à la non-localité), c'est-à-dire que les particules "s'ajustent" en fonction de l'orientation des détecteurs qu'ils vont rencontrer. Soit le "super-déterminisme". Et il conclut: "les physiciens n'ont pas de bon point de vue". Bohm, par contre, n'est pas impressionné outre mesure: "Je suis tout-à-fait prêt à abandonner la localité. Je pense que c'est une hypothèse arbitraire. Au cours des derniers siècles, elle a eu un poids énorme. Mais si vous remontez 1000 ou 2000 ans en arrière, presque tout le monde pensait de façon non-locale" ({BBC}, p.125). Peut-être, mais comme l'écrit Redhead, "Nos théories, dit Popper, sont des "filets que nous

construisons pour attraper le monde". Nous devons nous rendre compte que la mécanique quantique nous a amené un drôle de poisson" (*Re*, p.169).

V. Solutions possibles au problème de la mesure

Bell distingue "six mondes possibles", c'est-à-dire six attitudes ou solutions possibles. Il en range trois dans la catégorie "romantique" et trois dans la catégorie "non-romantique". La première attitude, non-romantique, est le pragmatisme. Comme la difficulté liée à la théorie quantique n'a aucune conséquence pratique (on sait bien ce qu'est une mesure), pourquoi s'en faire? Cette position, si elle vraiment prise au sérieux, c'est-à-dire en reconnaissant par ailleurs que le problème existe et en ne le dissimulant pas derrière un discours philosophique, est fort attrayante. Néanmoins, elle a ses limites. L'activité des physiciens théoriciens est tellement centrée sur les principes (particules élémentaires, big bang, trous noirs) qu'une attitude pragmatiste chez eux est pour le moins bizarre. De plus on rencontre parfois certains problèmes qui sont liés aux fondements de la mécanique quantique: si l'on étudie l'univers en tant que tel (par exemple, dans la cosmologie quantique) où se situe l'observateur? Si l'on néglige la réduction de la fonction d'onde (considérée comme non-fondamentale) comment réconcilier la mécanique quantique avec le chaos (voir *DG1*)?

La deuxième solution, romantique celle-là, est la position de Bohr discutée dans la section III. Elle est "romantique" parce qu'elle élève la contradiction presque au niveau d'un principe et souligne, à travers la notion de "complémentarité", notre incapacité à comprendre objectivement le monde. L'appareil de mesure est composé de particules qui obéissent aux lois quantiques, néanmoins lui est radicalement classique. Bohr, semble-t-il, aimait des aphorismes du genre "l'opposé d'une vérité profonde est aussi une vérité profonde" ou "la vérité et la clarté sont complémentaires" (*B*, p.190).

Une autre solution romantique consiste à placer l'opération R purement et simplement au niveau de la conscience. Le monde physique obéirait strictement à l'équation de Schrödinger, il serait entièrement décrit par sa fonction d'onde et donc toutes les superpositions macroscopiques (chat vivant et mort) s'y trouveraient si ce n'était l'action d'une conscience humaine immatérielle qui intervient pour réduire la fonction d'onde. Evidemment, pour adopter ce point de vue, il faut supposer que la conscience est ontologiquement distincte du cerveau, ce qui pose au moins autant de problèmes que cela n'en résout.

La dernière solution romantique consiste à rejeter purement et simplement l'opération R. La fonction d'onde a un statut objectif, elle donne une description complète du système physique et son évolution est toujours gouvernée par l'équation de Schrödinger. On est obligé alors d'introduire des univers parallèles: chaque fois qu'une mesure est faite, tous les résultats possibles coexistent, mais dans des univers différents. Donc, à chaque mesure, il se crée autant d'univers qu'il y a de résultats possibles de cette mesure, et dans chacun d'entre eux, il y a un de ces résultats. Evidemment, cette théorie est pour le moins bizarre: pensons au nombre d'univers qui coexistent. En un sens, c'est l'attitude la plus extrêmement réaliste qu'on puisse imaginer: postuler, uniquement pour des raisons de cohérence interne de la théorie, cette multitude de mondes est certainement la meilleure façon de provoquer Occam à aiguiser son rasoir. Par

ailleurs, le problème de savoir ce qui définit vraiment une mesure subsiste. Est-ce que les univers se démultiplient uniquement lors d'une mesure en laboratoire, ou également au cours d'autres processus physiques?²⁸

On ne saurait trop insister sur le fait qu'il faut absolument que ces univers parallèles existent vraiment pour que le problème soit résolu. En effet, on entend parfois l'objection "que voulez-vous dire par "existent"?. Probablement, les gens qui posent ce genre de questions savent ce qu'ils veulent dire par "exister" en ce qui concerne le monde dans lequel nous vivons (sinon on peut arrêter la discussion). Et bien, il faut que les autres mondes existent exactement de la même façon. En particulier, on ne peut pas considérer les autres mondes comme des artifices mathématiques ou quelque chose comme ça. Sinon, la difficulté reste entière: l'opération R distingue le monde réel (unique) des autres.²⁹

Si on relègue cette idée dans le domaine de la science-fiction on arrive à une deuxième solution non-romantique, c'est-à-dire essayer de faire en sorte que l'opération R soit réductible à U. Mais, comme on l'a vu, c'est impossible en laissant la théorie telle quelle (cfr appendice 1). La seule possibilité serait de modifier U et de la remplacer par une opération non-linéaire ou stochastique. Celle-ci devrait avoir deux propriétés: être suffisamment bien approximée par U 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 R. Divers auteurs ont fait des tentatives en ce sens, mais aucune ne semble être satisfaisante. Vu la difficulté mathématique inhérente au traitement d'équations non-linéaires, cette situation de fait 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. Certains invoquent l'élégance de l'équation de Schrödinger (parce que linéaire) contre cette approche. Outre que je ne vois pas bien pourquoi des critères esthétiques, forcément subjectifs, doivent jouer un tel rôle en science (surtout lorsqu'on essaye d'échapper à une incohérence - suprême inélégance), on peut aussi répondre, avec Penrose: "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" {Pe}. 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

²⁸Peut-on vraiment formuler cette théorie de façon cohérente? Voir Bell ({B}, chapitres 11 et 15) et Albert {A1} pour une critique plus approfondie de cette "solution". Albert suggère que, pour la rendre cohérente, on devrait introduire des "esprits multiples".

²⁹Bell: "Il est facile de comprendre l'attraction des trois mondes romantiques pour les journalistes qui essaient d'attirer l'attention de l'homme de la rue. L'opposé d'une vérité est aussi une vérité! Les scientifiques disent que la matière est impossible sans l'esprit ! Tous les mondes possibles sont des mondes réels !" ({B}, p.193-194).

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), mais ce n'est pas une mince qualité que de rendre compte des phénomènes quantiques de façon précise et sans faire appel à aucun principe philosophique. Dans cette théorie, appelée "GRW" d'après les noms de ses auteurs {GRW}, 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.

Finalement, une troisième possibilité non romantique consiste à considérer R comme non fondamental, mais sans changer U. Mais comme alors R ne peut se réduire à U, il faut bien introduire autre chose dans la théorie que la fonction d'onde. On appelle "variable cachée" toute quantité introduite dans la description du système et qui ne se réduit pas à la fonction d'onde. Le théorème de Bell rend en général les gens sceptiques quant à la possibilité d'introduire de telles variables. De plus, on cite encore, parfois, le théorème de von Neumann qui tentait de démontrer l'impossibilité d'introduire des variables cachées tout en conservant les prédictions de la mécanique quantique. Pour ce qui est de l'intérêt de ce théorème, Bell en a fait une analyse détaillée ({B}, 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!" {Be3} 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 une question intéressante pour les historiens et les sociologues des sciences {Pi}.

Bell explique qu'il était toujours préoccupé par l'aspect "subjectif" de la mécanique quantique, à savoir la nécessité d'introduire l'observateur dans la théorie (ou l'opération R). Il connaissait aussi le théorème de von Neumann qui soi-disant montrait qu'on ne pouvait faire mieux. Mais, en 1952, il vit l'impossible se réaliser. David Bohm, reprenant les idées de de Broglie, introduisait des "variables cachées", et donnait une théorie "en tous points équivalente à la mécanique quantique d'un point de vue expérimental, mais qui néanmoins était non-ambigüe et réaliste" ({BBC}, p.56). Dans la théorie de de Broglie-Bohm, l'état complet d'un système est donné par la fonction d'onde et par les positions des particules (cfr appendice 3). L'évolution de la fonction d'onde est donnée par l'équation de Schrödinger, c'est-à-dire par U, sans aucun changement. La fonction d'onde, à son tour, guide les particules. On peut la penser comme une espèce de vitesse généralisée. La théorie est donc parfaitement déterministe. Néanmoins, on peut montrer que, si la distribution statistique des particules à un instant donné est identique à celle prédite par la mécanique quantique, alors il en sera ainsi pour tous les temps ultérieurs. De cette façon, on retrouve l'accord empirique entre cette théorie et les prédictions de la mécanique quantique. L'opération R perd son statut fondamental: lors d'une mesure, on apprend quelque chose sur le système (tout en le modifiant), mais de ce point de vue, le statut des probabilités n'est pas plus surprenant que dans des situations classiques (un lancer de dé, par exemple).

Comment la théorie de Bohm échappe-t-elle aux différents théorèmes d'impossibilité? C'est d'une simplicité déroutante: les "variables cachées" ici sont simplement les positions des particules. C'est une théorie de la matière en mouvement. Jamais aucun argument n'a été avancé pour montrer que l'introduction de ces variables-là était impossible. C'est pourquoi tous les discours

du genre "la lune n'est pas là quand on ne la regarde pas"³⁰ ou encore "il n'y a rien de réel" ne sont strictement basés sur rien. Ce que l'argument de Bell nous dit c'est qu'il est impossible, en général, d'introduire des variables cachées de spin par exemple (les instructions de la section IV). C'est à cette impossibilité que les discours sur la "disparition du réel" font (mal) allusion, mais c'est tout autre chose que les positions. Supposer que ces variables de spin doivent nécessairement exister avant la "mesure" revient à faire preuve de réalisme naïf et à négliger le rôle "actif" de l'appareil de mesure.³¹ C'est un des grands mérites de la théorie de Bohm que de montrer explicitement pourquoi ces autres variables cachées ne peuvent pas exister et pourquoi, conformément à l'intuition de Bohr, leur valeur est "déterminée" par la mesure. Néanmoins, à la différence de Bohr, on n'a pas affaire ici à un postulat imposé de l'extérieur mais bien à une conséquence des équations de la théorie. Par ailleurs, toute "logique quantique" devient manifestement inutile une fois que le rôle de l'appareil de mesure est bien compris.

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. 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 acquiert une signification physique bien précise.

Bien entendu, cette théorie est non-locale. Le théorème de Bell nous montre que toute théorie au sens propre du terme aura cette propriété. La non-localité doit donc être vue comme une qualité de la théorie de Bohm et non comme un défaut. Mais, évidemment, le conflit avec la relativité se pose et n'est pas résolu (voir Appendice 3). Avant de tirer des conclusions hâtives de cette situation, pensons à ce qui a été accompli, dans le cadre non-relativiste, et qui allait à l'encontre des préjugés les mieux établis. D'autre part, le problème de la mesure n'est même jamais formulé d'un point de vue relativiste. Admettons finalement que l'on envisage la théorie de Bohm uniquement comme théorie non-relativiste. Aucune objection sérieuse n'a jamais été soulevée dans ce cadre-là. Or, clairement ici le problème de la mesure n'existe plus. Dès lors, il faudrait dire que le problème de la mécanique quantique est le problème de l'invariance sous le groupe de Lorentz, puisqu'à part cela, la théorie de Bohm résout tous les problèmes. Ce serait déjà un grand changement de perspective que de poser ainsi la question.

En conclusion, pour citer Albert, 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 quoique ce soit qui sont 'incompatibles' l'une avec l'autre". ({Al}, p.169). Ajoutons, avec moins de lyrisme, que cette théorie rend précise l'intuition géniale de Bohr concernant le

³⁰L'origine de cette phrase remonte à Einstein, qui, excédé par la référence constante à l'observation, a dit à Pais: "Croyez-vous vraiment que la lune n'est là que quand vous la regardez?" ({Pa}, p.907).

³¹Voir {DG2} pour une critique de ce réalisme naïf.

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 (2) de l'appendice 3) 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 des siècles futurs auront à résoudre.

VI. Conclusions

Dans les années 20 et 30 de ce siècle, une philosophie à tendance sceptique 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 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.

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" {Bo4}), 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.

Par ailleurs, le théorème de Bell est une bonne illustration des vertus du réalisme. 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 aiguille et il pensait que les questions d'Einstein étaient de ce type-là ({Me1}, p.81). Bell par contre connaissait la théorie de Bohm, la trouvait 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. "Qu'on l'aime ou non, elle est un contreexemple parfait à l'idée que le vague, la subjectivité, l'indéterminisme nous sont imposés par les faits expérimentaux de la mécanique quantique non-relativiste" {B}.

Je laisserai le mot de la fin à un philosophe, à Sénèque qui, parlant des comètes, exprimait son

optimisme dans l'avenir des connaissances humaines: "Le jour viendra où, par une étude suivie de plusieurs siècles, les choses actuellement cachées paraîtront avec évidence, et la postérité s'étonnera que des vérités si claires nous aient échappé."

Remerciements

Je remercie Robert Franck de m'avoir invité à participer à ce colloque. Au fil des années, j'ai bénéficié de nombreuses conversations sur les fondements de la mécanique quantique ou sur cet article avec entre autres, Bertrand Hespel, Antti Kupiainen, Christian Maes, Tim Maudlin, André Naudts et Jean Pestieau. Je les en remercie, tout en précisant que leurs vues ne rejoignent pas nécessairement les miennes. Mais c'est au cours de nombreuses discussions avec Sheldon Goldstein que j'ai appris l'essentiel de ce que je tente d'expliquer dans cet article.

Appendice 1: Le problème de la mesure

Le problème est simple à énoncer et remonte à von Neumann {VN}³². Les principes de base de la mécanique quantique peuvent se résumer ainsi:

- L'état physique d'un système est un élément $|\Psi\rangle$ d'un espace vectoriel (espace de Hilbert).

- L'évolution au cours du temps est donnée par

$$|\Psi_t\rangle = U(t) |\Psi_0\rangle \quad (1)$$

où $|\Psi_t\rangle$ désigne l'état au temps t et $U(t)$ est un opérateur linéaire (unitaire). Ceci implique le principe de superposition: si $|\Psi_0\rangle = |\Psi'_0\rangle + |\Psi''_0\rangle$, alors $|\Psi_t\rangle = |\Psi'_t\rangle + |\Psi''_t\rangle$,

et le déterminisme: $|\Psi_t\rangle$ est univoquement déterminé, étant donné $|\Psi_0\rangle$. L'évolution dynamique donnée par (1) est équivalente à l'équation de Schrödinger.

- Si on "mesure" au temps t une quantité physique représentée par un opérateur A où (pour simplifier):

$$\Psi_t = c_1 |\Psi^1\rangle + c_2 |\Psi^2\rangle \quad (2)$$

avec $A |\Psi^{(i)}\rangle = \lambda_i |\Psi^{(i)}\rangle$, $i = 1, 2$, et $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$, alors le résultat de la mesure sera λ_i avec probabilité $|c_i|^2$ et l'état physique du système après la mesure sera $|\Psi^{(i)}\rangle$ où $i=1$ ou 2 selon que le résultat de la mesure est λ_1 ou λ_2 .

C'est dans ce dernier énoncé qu'intervient l'opération R , la réduction de la fonction d'onde, et c'est de là que vient le problème. Ψ_t devient égal à $|\Psi^1\rangle$ ou $|\Psi^2\rangle$ après la mesure. Cette réduction est nécessaire parce que, si on effectue une deuxième mesure de la quantité représentée par A , on retrouve avec certitude λ_1 ou λ_2 , selon le résultat de la première mesure. Mais cette réduction n'est pas donnée par la dynamique (de Schrödinger) $U(t)$. Pour montrer cela, il faut voir si l'action de l'appareil de mesure ne pourrait pas produire cette réduction (au moins approximativement). Même si l'on ne sait pas analyser l'appareil de mesure en détail, on peut se convaincre, en utilisant seulement le caractère linéaire et déterministe de l'équation de Schrödinger, que c'est impossible.

Voici l'argument. Si la mécanique quantique s'applique à tout et que la fonction d'onde représente la description complète du système physique, alors il faut attribuer une fonction d'onde à l'appareil de mesure, ainsi qu'au système appareil-objet mesuré.

Considérons un système où, avant l'expérience, la particule a la fonction d'onde $|\Psi^1\rangle$ (comme dans l'équation (2), avec $c_1 = 1$, $c_2 = 0$). Notons $|\Phi\rangle$ la fonction d'onde initiale de l'appareil de mesure³³. Avant l'interaction entre la particule et l'appareil, le système aura la fonction d'onde $|\Phi\rangle|\Psi^1\rangle$. Après l'interaction, la fonction d'onde sera $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$ où $|\Phi^1\rangle$ dénote une fonction d'onde indiquant que l'appareil a "mesuré" la particule et que celle-ci est dans l'état $|\Psi^1\rangle$. En réalité, $|\Phi^1\rangle$ représente une classe de fonctions d'onde, et évolue dans le temps. Mais peu importe, ce qui compte c'est qu'il existe nécessairement une différence entre $|\Phi^1\rangle$ et une (ou des) fonction d'onde

³²Voir {A1} pour une discussion très claire.

³³Que cette fonction soit incalculable en pratique ou change au cours du temps de façon compliquée n'a ici aucune importance.

$|\Phi^2\rangle$, indiquant que la particule est dans l'état $|\Psi^2\rangle$. En effet, nous pouvons distinguer entre 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 $|\Psi^2\rangle$, après la mesure le système sera, de façon analogue, dans l'état $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$.

Jusqu'à présent, rien de problématique: nous avons seulement exprimé le fait que l'appareil de mesure est un bon appareil de mesure. Le problème se pose si l'on considère l'état (2) comme état initial de la particule. Alors, le caractère linéaire et déterministe de l'évolution de Schrödinger implique que le système sera nécessairement dans l'état

$$c_1|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle + c_2|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle \quad (3)$$

après la mesure, si du moins le système complet obéit à cette loi d'évolution. Le problème c'est que (3) ne représente nullement l'état de l'appareil de mesure tel que nous le connaissons. Cet appareil est soit dans l'état $|\Phi^1\rangle$, soit dans l'état $|\Phi^2\rangle$, 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. On peut dire que l'appareil de mesure n'est pas isolé, ou que la mesure se passe réellement lorsque notre cerveau interagit (visuellement) avec l'appareil, ça ne change rien à l'affaire. Les mesures ont des résultats bien définis³⁴ et le formalisme de la mécanique quantique ne rend pas compte de ce fait.

Néanmoins, ce problème a peu de conséquences pratiques: supposons que je décide que la fonction d'onde est réduite (en $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$ ou $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$) par un mécanisme intervenant durant la mesure (en violant donc l'évolution de Schrödinger). Je n'ai 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 différentes théories de la réduction. C'est la même chose si on veut comparer la théorie de Bohm avec des théories de réduction de la fonction d'onde: en principe ces théories sont expérimentalement distinguables, en pratique non. Mais cette indistinguabilité pratique ne permet nullement d'éliminer le problème³⁵.

En résumé, on se trouve devant un dilemme: on voudrait pouvoir soutenir les trois assertions suivantes ({Ma}, p.144-145):

- 1) Les appareils de mesure, et les autres objets macroscopiques tels les chats sont dans des états bien définis.
- 2) La fonction d'onde est la description complète du système.
- 3) L'évolution de Schrödinger est toujours correcte et s'applique à tout (ultimement, à la fonction d'onde de l'univers).

³⁴On peut coupler l'appareil à un chat, comme le suggère 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 qui ne correspond pas à la réalité.

³⁵voir {A1} pour une discussion détaillée. Par ailleurs, Bell {Be2} a bien disséqué les différentes façons dont le problème est esquivé dans les manuels.

Le fait est que (malheureusement) ces trois assertions ne sont pas mutuellement compatibles. Dès lors, laquelle abandonner? Selon le choix qu'on fait, on s'engage dans une des trois directions suivantes:

- On abandonne 1), le chat vivant et le chat mort coexistent, mais dans des univers différents. On s'oriente vers les 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.
- On abandonne 3), la dynamique doit être stochastique ou non-linéaire puisque les seules propriétés de U qu'on a utilisé pour arriver à l'état (3) étaient le caractère linéaire et déterministe de U. La version "stochastique" est développée dans la théorie GRW {GRW}.

Bell ({B}, chap. 11 et 15) a montré qu'il était difficile de développer l'approche 1) de façon consistante (outre son extrême bizarrerie). Pour lui, seules les solutions 2 et 3 mènent à une "image précise": "La grande question, à mon avis, est de savoir laquelle de ces deux images précises peut être redéveloppée d'une façon invariante sous le groupe de Lorentz, à supposer qu'il y en ait une" {Be2}.

Appendice 2: Le théorème de Bell

Nous suivons la démonstration simplifiée donnée par Mermin $\{Me1, Me2\}$. On a 3 positions (1,2,3) pour les appareils de mesure et deux réponses possibles (oui/non). L'argument d'Einstein, Podolski et Rosen nous a montré que, si le monde est local, les particules emportent nécessairement avec elles des instructions pour chaque orientation des détecteurs et que celles-ci sont identiques lorsque les détecteurs sont sur la même position; donc, on arrive aux huit possibilités suivantes:

	1	2	3
n°1	oui	oui	oui
n°2	oui	oui	non
n°3	oui	non	oui
n°4	oui	non	non
n°5	non	oui	oui
n°6	non	oui	non
n°7	non	non	oui
n°8	non	non	non

Dans ce tableau, les colonnes 1,2,3 représentent les orientations possibles des détecteurs. Les triplets représentent les réponses communes que les particules s'apprêtent à donner selon la position des détecteurs: par exemple, pour la réponse n°2, on a oui/oui/non, c'est-à-dire 1 \rightarrow oui, 2 \rightarrow oui, 3 \rightarrow non.

Comme la position des détecteurs est fixée indépendamment des particules³⁶, chaque particule doit emporter avec elle des réponses à toutes les questions possibles et elles doivent être les mêmes des deux côtés, pour rendre compte des corrélations parfaites. Donc, on a les huit possibilités indiquées au tableau et rien d'autre. Maintenant, considérons un grand nombre d'expériences, préparées dans les mêmes conditions. Rien ne nous dit avec quelles fréquences les différentes possibilités vont apparaître. On doit avoir une fois sur deux une réponse "oui", une fois sur deux une réponse "non". Mais on pourrait très bien, pour le moment, avoir une fois sur deux les instructions n°1, une fois sur deux les instructions n°8, et jamais les autres. La seule chose qui est évidente, c'est que, si ces instructions existent, elles apparaissent avec une certaine fréquence.

Ce que Bell montre, c'est qu'il n'existe aucune façon d'associer des fréquences aux différentes instructions qui rende compte des résultats expérimentaux. Pour le démontrer, voyons d'abord les résultats statistiques que l'on obtient lorsqu'un détecteur est sur la position 1 et l'autre sur la position 2: on obtient 1/4 de réponses oui/non ou non/oui et 3/4 de réponses oui/oui ou non/non.

³⁶L'abandon de cette hypothèse a été envisagée à la fin de la section 4.

Si on regarde le tableau, les instructions 3, 4, 5, 6 donnent bien des réponses oui/non ou non/oui et les autres des réponses oui/oui ou non/non. Donc, lorsqu'on prépare les systèmes dans les mêmes conditions, on obtient 1/4 de particules dans les états 3, 4, 5 ou 6. Maintenant, si l'on met un détecteur sur la position 2 et l'autre sur la position 3 on obtient de nouveau un quart de réponses oui/non ou non/oui. Ce qui veut dire (cfr tableau) que l'ensemble des états 2, 3, 6 et 7 apparaît avec une fréquence 1/4. Ceci implique que l'ensemble des positions 2, 3, 4, 5, 6 et 7 apparaît avec une fréquence au plus égale à 1/2. C'est-à-dire que les états 1 et 8 (tous oui ou tous non) ont ensemble une fréquence au moins égale à 1/2. Maintenant arrive la contradiction: si l'on place un détecteur sur la position 1 et l'autre sur la position 3, le nombre de réponses oui/non ou non/oui devient égal à 3/4. Mais dans les états un et huit (dont la fréquence, on vient de le voir, est supérieure à 1/2) la réponse pour cette position sera oui/oui ou non/non. Donc, il est impossible d'attribuer une fréquence, de quelque façon que ce soit, aux "variables cachées" oui/non. Ceci revient à dire qu'elles n'existent pas.

Résumons l'argument: l'ensemble des réponses a été introduit comme seule explication locale possible des corrélations parfaites. Ces dernières ne contraignent nullement la distribution statistique des différents jeux de réponses. Ce n'est qu'en plaçant les détecteurs dans des directions différentes qu'on se rend compte qu'aucune distribution statistique ne peut rendre compte des résultats observés.

Remarquons qu'on utilise aucune notion théorique de probabilité, seulement les fréquences empiriques. De plus, une version améliorée de l'argument {GHZ} ne fait appel à aucune statistique.

Par ailleurs, il est faux de dire que l'argument nous force à "choisir" entre la localité et le réalisme. Ici "réalisme" signifie sans doute l'existence des "instructions" voulant dire que les propriétés que l'on mesure (spin, polarisation) préexistent à la mesure. Cela n'a rien à voir avec le réalisme philosophique. En effet, ce n'est nullement une obligation pour le réaliste d'admettre que telle propriété, le spin par exemple, a une valeur bien déterminée, donnée à l'avance. Mais l'argument de Bell-EPR réfute à la fois ce "réalisme" et la localité: Einstein, Podolski et Rosen montrent que la localité implique ce "réalisme" et Bell montre que ce "réalisme" est intenable. Il n'y a pas de choix à faire, et, par ailleurs, ce n'est nullement une question philosophique.

Venons-en maintenant à la description quantique de la situation: la source émet une paire de particules dont la fonction d'onde est

$$(1/\sqrt{2})(|1u,2d\rangle - |1d,2u\rangle) \quad (1)$$

où les particules sont notées 1, 2, et où u (up) et d (down) se rapportent à l'orientation du spin (ou de la polarisation) selon une direction donnée. Une propriété remarquable de l'état (1) est qu'il garde la même forme quelle que soit la direction considérée (voir p.ex. {Pe}, Chap.6). Les détecteurs sont placés de façon à "mesurer le spin" dans différentes directions et les angles entre ces directions sont choisis convenablement (dans le calcul quantique, les valeurs 1/4 et 3/4 viennent de ce que $\sin^2 30^\circ = 1/4$ et $\sin^2 60^\circ = 3/4$).

Si on interprète la mécanique quantique en considérant la réduction comme une opération physique réelle (par exemple, dans le cadre d'une théorie GRW {GRW}), alors la non-localité

apparaît de façon manifeste: une mesure sur la particule 1 va réduire l'état (1) en $|1u, 2d\rangle$ ou $|1d, 2u\rangle$ (selon le résultat), mais ce faisant, l'état de la particule 2 est modifié également sans qu'il y ait la moindre action directe, locale, sur cette particule. (Pour la facilité, on a identifié le résultat up/down avec oui/non à droite et on a adopté la convention opposée à gauche).

Appendice 3: La théorie de Bohm

La première qualité de cette théorie est que la fonction d'onde Ψ y acquiert un sens physique précis; son statut est double, dynamique et statistique³⁷.

Commençons par l'aspect dynamique. Tout d'abord, pour un système de n particules, l'état complet du système est donné par (x, Ψ) où Ψ est la fonction d'onde $\Psi = \Psi(x_1, \dots, x_n)$ et $x = (x_1, \dots, x_n)$ dénote les positions des particules. Ce sont les "variables cachées" de la théorie. La dynamique est donnée par

$$\Psi_t = U(t) \Psi_0 \quad (1)$$

$$\text{et} \\ dx_i/dt = (\hbar/m_i) \text{Im}[\nabla_i \Psi / \Psi] \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

où la première équation est simplement la dynamique de Schrödinger et la deuxième montre comment Ψ "guide" les particules en déterminant leurs vitesses (∇_i est le gradient par rapport à x_i et m_i est la masse).

La théorie de Bohm s'arrête (presque) là. Voyons ce qu'elle implique. Première remarque: elle est complètement déterministe: étant donné (x_0, Ψ_0) , les positions et la fonction d'onde en des temps ultérieurs sont déterminés. Par ailleurs, ceci résout immédiatement le 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: position du compteur de vitesse par exemple. De même, les positions des particules composant le chat suffisent à déterminer s'il est vivant ou mort³⁸. Donc, il n'y a, dans cette théorie, nul besoin d'accorder un statut spécial à l'observateur, à la mesure, etc.

La dynamique de Bohm n'est pas philosophiquement différente de la mécanique classique mais elle est néanmoins fortement non-classique. En effet dans l'expérience des deux trous (voir {Fe1}) la particule passe par un trou mais sa fonction d'onde, qui la guide, est différente selon que le deuxième trou est ouvert ou non³⁹.

Par ailleurs, il y a une réduction "effective" de la fonction d'onde dans cette théorie. Lors d'une mesure, si on obtient une fonction d'onde telle que celle donnée par l'équation (3) de l'appendice 1, il se fait que les supports de $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$ et de $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$ sont en général pratiquement disjoints, et le restent dans le futur. Or la particule se trouve soit dans le support de $|\Phi^1\rangle|\Psi^1\rangle$ soit dans le support de $|\Phi^2\rangle|\Psi^2\rangle$ et elle est guidée par la "partie" de la fonction d'onde dans le support de laquelle elle se trouve (voir l'équation (2)).

³⁷L'Hamiltonien H a un statut analogue (mais ce n'est qu'une analogie) en mécanique classique: il gouverne la dynamique, mais, en même temps, la probabilité d'une configuration à l'équilibre est proportionnelle à $e^{-\beta H}$.

³⁸Comme le remarque Bell, c'est une erreur historique d'appeler les positions des "variables cachées"; en effet, ce sont les positions qui sont manifestes, pour nous, et la fonction d'onde qui est "cachée" c'est-à-dire, qui doit être construite à partir de la théorie et des expériences.

³⁹Voir {BoF} pour une simulation numérique de cette expérience, du point de vue de la théorie de Bohm.

Donc, d'un point de vue pratique, on peut "oublier" l'autre partie (ou "branche") de la fonction d'onde. La réduction apparaît ici mais ni comme principe fondamental ni comme mystère (voir {A1}, {A11} et surtout {D} pour une discussion plus approfondie).

Maintenant, envisageons l'aspect proprement statistique de la théorie: comment retrouver les prédictions statistiques de la mécanique quantique et les inégalités d'Heisenberg?

La réponse est très simple. Supposons qu'on ait un grand nombre de particules distribuées aléatoirement au temps $t=0$ selon la distribution $|\Psi_0|^2$. Alors, une conséquence mathématique élémentaire des équations (1) et (2) est qu'au temps t ces particules seront distribuées aléatoirement selon la loi $|\Psi_t|^2$. Il suffit donc de supposer qu'au départ les particules sont distribuées selon $|\Psi_0|^2$ pour qu'elles aient la distribution statistique prédite par la mécanique quantique en tout temps.

Evidemment, en fin de compte, toute hypothèse sur des distributions statistiques initiales renvoie aux conditions initiales de l'Univers. On a le même problème en mécanique statistique quand on veut expliquer la deuxième loi de la thermodynamique. Penrose {Pe} explique bien que, pour rendre compte de cette loi, on doit supposer que l'Univers a commencé dans des conditions extrêmement "improbables". Et l'hypothèse que l'on fait dans le cadre de la théorie de Bohm est infiniment plus naturelle que celle que l'on doit faire pour rendre compte de la deuxième loi de la thermodynamique.

En effet, ici il suffit de supposer que les particules sont distribuées aléatoirement selon la loi $|\Psi_0|^2$ c'est-à-dire sont à l'équilibre quantique. De là on déduit les prédictions statistiques de la mécanique quantique, y compris les inégalités d'Heisenberg, ainsi que l'impossibilité, en principe, "d'aller plus loin" et de contrôler les positions des particules pour obtenir des résultats violant ces inégalités (voir {D}).

Pour expliquer la relation entre l'équilibre quantique et les limites que celui-ci impose à notre connaissance, prenons une analogie dans la physique statistique. Considérons une boîte remplie d'un gaz que l'on comprime au moyen d'un piston, dans une moitié de la boîte. Ensuite, on retire le piston et on laisse le gaz atteindre l'équilibre dans la boîte. Une fois l'équilibre atteint, il est impossible, au moyen d'observations faites sur le gaz, de déterminer dans quelle partie de la boîte le gaz était comprimé antérieurement. Evidemment, en principe, il "suffit" de connaître (d'un point de vue classique) les positions et les vitesses de toutes les particules du gaz pour pouvoir rétrodire son histoire. Mais le fait est que toutes les mesures (macroscopiques) auxquelles nous avons réellement accès ne nous permettent pas de résoudre ce problème. C'est une propriété des distributions statistiques des particules du gaz à l'équilibre que de "bloquer" notre connaissance et de nous empêcher de dire d'où il vient.

De plus, c'est parce qu'on dispose de systèmes qui ne sont pas à l'équilibre, tels les hommes et les pistons que nous pouvons mettre le gaz dans une moitié de la boîte, ou, de façon générale, faire des expériences et acquérir des connaissances. Mais si tout ce qui est en dehors de notre cerveau était à l'équilibre, toute connaissance serait impossible ou illusoire. Ce serait la justification physique du solipsisme.

Dans le monde réel, la fonction d'onde n'est pas à l'équilibre ce qui nous permet d'exister et de

connaître. Mais si les positions des particules, de toutes les particules, sont à l'équilibre quantique, on peut comprendre qu'il n'y a pas moyen d'aller au-delà des prédictions statistiques de la mécanique quantique. C'est peut-être un des aspects les plus remarquables de la théorie de Bohm que d'introduire une approche "matérialiste" de l'inconnaissable c'est-à-dire que ce qui est connaissable et inconnaissable n'est pas posé a priori, mais dépend, enfin de compte, de la façon dont le monde est fait.

Un autre aspect positif de la théorie de Bohm est qu'elle explique le rôle essentiel de l'appareil de mesure. Ce rôle évidemment a été souligné par Bohr mais dans un langage a priori ou philosophique, alors que dans la théorie de Bohm ce rôle fait partie des lois de la nature. En effet, et on ne saurait souligner assez ce point, il n'y a pas, dans cette théorie, de "variables cachées" assignant des valeurs prédéterminées aux "observables" tels que moment, spin, etc. C'est d'ailleurs ce qui permet à la théorie de Bohm d'échapper à toutes les "preuves d'impossibilité" de théories de variables cachées.

Il est vrai que comme la théorie est déterministe, si on précise 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'action de l'appareil de mesure est d'agir sur la fonction d'onde de la particule (en déterminant l'Hamiltonien du système c'est-à-dire aussi l'opérateur $U(t)$) via l'équation (1); la fonction Ψ , à son tour, guide la particule. Donc l'interaction concrète de l'appareil de mesure doit être spécifiée pour savoir ce que l'appareil de mesure fait vraiment. Albert {A11} donne un exemple de "mesure de spin" où en tournant l'appareil on change de 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. Ceci montre bien combien les mots "mesure" et "observables" sont dangereux. On ferait mieux de parler d'interaction ou d'expériences.

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 configuration⁴⁰. Par exemple, pour deux particules on a $\Psi(x_1, x_2)$ 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 de l'autre. Maintenant on peut agir sur Ψ grâce à une interaction physique localisée dans V_2 . Mais ceci peut influencer le comportement de la particule n°1, via l'équation (2) (sauf si $\Psi(x_1, x_2)$ se factorise en $\Psi_1(x_1)\Psi_2(x_2)$). C'est exactement ce qui se passe avec la fonction d'onde donnée par l'équation (1) de l'appendice 2.

Comment réconcilier la théorie de Bohm avec la relativité, vu qu'elle est non-locale? Il faut distinguer deux questions: premièrement, peut-on avoir une théorie à la Bohm qui rende compte des résultats prédits par la théorie quantique des champs? Deuxièmement, cette théorie sera-t-elle invariante sous le groupe de Lorentz? Pour ce qui est de la première question, Bell propose dans "Beables for quantum field theory" {B} de prendre le nombre de fermions comme variable remplaçant les positions des particules. Même si sa théorie n'est pas très développée mathématiquement, Bell ne voit pas de problème de principe pour répondre positivement à la

⁴⁰Pour un système à plusieurs particules. Par contre, un champ classique, par exemple le champ électrique, est toujours défini sur l'espace réel.

première question. Mais la théorie ainsi formulée n'est pas invariante sous le groupe de Lorentz. 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 y a une espèce d'éther permettant de définir une simultanéité absolue. Bell explique bien qu'il n'y a, en fait, aucune incohérence ni aucune contradiction avec l'expérience à présenter la relativité au moyen d'un éther (B chapitre 9). Cela paraît simplement arbitraire et inélégant. Mais la non-localité nous force peut-être à adopter une solution allant dans ce sens. Comme dit Bell, "c'est une drôle de façon de faire le monde" mais c'est peut-être ainsi qu'il est fait.

Appendice 4: guide bibliographique

J'indique ici quelques articles ou livres où le lecteur pourra trouver des compléments d'information.

1. *Les problèmes de la mécanique quantique et ses solutions possibles*: voir {Al} chap.4, {Be2} et "The moral aspect of Quantum Mechanics" (chap.3 de {B}) pour l'exposé du problème et la réfutation de solutions trop simples.

Les différentes attitudes possibles sont discutées dans "Six possible worlds of quantum mechanics" ({B}, chap.20). La théorie des "many-worlds" et "many minds" se trouve analysée dans {Al} et dans "Quantum mechanics for cosmologists" ({B} chap.15, et aussi chap.11, où cette théorie est comparée à celle de Bohm). Sur la théorie "GRW" (modifier l'équation de Schrödinger de façon stochastique) voir, outre {GRW}, le chapitre 22 de {B} et le livre d'Albert ({Al} chapitre 5).

Pour la théorie de Bohm, outre la version originale {Bo1} on peut lire les chapitres 17, 20 et 14 de {B}. Bell explique pourquoi les "preuves d'impossibilité" des théories de variables cachées, comme celle de von Neumann, n'en sont pas, ce qui est fort intéressant (vu le crédit accordé spontanément à ces "preuves") d'un point de vue historique.

Une introduction pédagogique à la théorie de Bohm est due à Albert ({Al1}, {Al}).

L'exposé le plus détaillé de l'aspect statistique de la théorie de Bohm se trouve dans {D} (voir aussi {DG1}, {DG2}).

Pour une version "Bohmienne" de la théorie quantique des champs voir "Beables for quantum field theory" ({B} chapitre 19) et pour une façon de présenter la relativité restreinte qui peut être compatible avec la non-localité quantique voir "How to teach special relativity" (chap. 9 de {B}).

2. *La non-localité*: l'article de Bell le plus clair sur ce sujet est "Bertlmann's socks and the nature of reality" ({B} chapitre 16). Il faut dire que la non-localité est tellement choquante qu'il est normal de voir que, même chez Bell, il y a une évolution, au moins dans la présentation du résultat. A mon sens, c'est dans "Bertlmann's socks" que la non-localité est énoncée le plus clairement. En particulier, tous les articles de Bell parlent de probabilités (conditionnelles) ce qui crée parfois l'illusion qu'il y a dans l'argument quelque subtilité associée à l'usage du concept théorique de probabilité. C'est un des avantages de la présentation due à Mermin que de tout formuler en terme de fréquences empiriques ({Me1, Me2} voir aussi {He} pour une discussion élémentaire et une réfutation de quelques idées fausses assez répandues). Une discussion pédagogique de tous les théorèmes concernant les variables cachées se trouve dans {Me4}. La non-localité est bien expliquée dans le livre d'Albert {Al} et dans {St}. Dans ces textes, on peut voir que ni le déterminisme ni le "réalisme" ne sont posés comme hypothèses.

Finalement, pour une discussion détaillée de la non-localité et des problèmes liés à la relativité, l'ouvrage de référence est Maudlin {Ma}.

3. Pour une perspective historique, on consultera {Ja} comme référence générale mais surtout

{Fo} pour le climat intellectuel dans lequel est né la mécanique quantique. Pour un bon résumé, voir {GL}. On peut lire dans {Pi} une analyse du fait que le théorème de von Neumann "réfutant" les théories de variables cachées a longtemps été cité après que ce théorème ait lui-même été "réfuté" par l'existence de la théorie de Bohm.

Bibliographie

{Al} D. Albert, Quantum Mechanics and Experience, Harvard University Press, Cambridge 1992.

{Al1} D. Albert, Bohm's alternative to quantum mechanics, Scientific American, May 1994.

{As} A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analysers, Phys.Rev.Lett. 49, 1804-1807 (1982).

{Be3} J.S. Bell, Interview dans Omni, May 1988, p. 88.

{Be2} J.S. Bell, Against "measurement", Physics World, 3, 33-40 (1990).

{BS} J.S. Bell, Bertlmann's socks and the nature of reality, Chapitre 16 dans {B}.

{B} J.S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge 1993.

{Be} J. Bernstein, Quantum Profiles, Princeton University Press, Princeton (1991).

{Ber} M. Berry, Principles of Cosmology and Gravitation, Cambridge University Press, Cambridge (1976).

{Bo2} D. Bohm, Causality and Chance in Modern Physics, Harper, New York (1957).

{Bo1} D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables", Parts 1 and 2, Phys. Rev. 89, 166-193 (1992).

{Bo3} N. Bohr, Can quantum mechanical description of reality be considered complete ? Phys. Rev. 48, 696-702 (1935).

{Bo4} N. Bohr, Physique atomique et connaissance humaine, Gonthier (1961).

{Bor} M. Born (ed.), The Born-Einstein Letters, Macmillan, Londres (1971).

{Br} H. Broch, Au coeur de l'extraordinaire, l'Horizon chimérique, Bordeaux (1992).

{Cu} J.T. Cushing, E. MacMullin (eds.), Philosophical Consequences of Quantum Theory. Reflections on Bell's Theorem, University of Notre Dame Press, Notre Dame (1989).

{BBC} P.C.W. Davies, J.R. Brown (eds.), The Ghost in the Atom (BBC interviews), Cambridge University Press, Cambridge (1989).

{De} B. d'Espagnat, Une incertaine réalité, Gauthier-Villars, Paris (1981).

{Di} Discover, October 1982, p. 69.

{D} D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty, *J. Stat. Phys.*, 67, 843-907 (1992).

{DG1} D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Quantum chaos, classical randomness and Bohmian mechanics, *J. Stat. Phys.* 68, 259-270 (1992).

{DG2} D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, Naive realism about operators, préirage, Université de Rutgers.

{EPR} A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum mechanical description of reality be considered complete?, *Phys. Rev.* 47, 777-780 (1935).

{Fe1} R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading (1965).

{Fe} R.P. Feynman, Simulating physics with computers, *Intern. Journal of Theor. Phys.* 21, 467 (1982).

{Fo} 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).

{Ga} M. Gardner, *The New Age. Notes of a Fringe Watcher*, Prometheus Books, Buffalo (1988).

{GMH} 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*, Proceedings of the 25th International Conference on High Energy Physics, Singapore, 1990, K.K. Phua and Y. Yamaguchi, eds. World Scientific, Singapore (1991); *Classical equations for quantum systems*, *Phys. Rev.* D47, 3345-3382 (1993).

{GRW} G.C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems, *Phys. Rev.* D34, 470-491 (1986).

{GL} 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 (1994).

{GHZ} D. Greenberger, M. Horn, A. Shimony, Z. Zeilinger, Bell's theorem without inequalities, *Am. J. Phys.* 58, 1131-1143 (1990).

{Gri} J. Gribbin, *Le chat de Schrödinger*, Le Rocher, Monaco (1984).

{Gr} 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).

{Hei} W. Heisenberg, *La nature dans la physique contemporaine*, Gallimard, Paris (1962).

{He} N. Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, Garden City (1985).

{Ja} M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York (1974).

{LS} C. Levi-Strauss, interview dans ``Les grands entretiens du Monde'', *Le Monde*, dossiers et documents, nr spécial, mai 1994.

{Ma} T. Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell, Cambridge (1994).

{Ma1} T. Maudlin, A modest proposal concerning laws, counterfactuals and explanations, prétirage, Université de Rutgers.

{Me2} D. Mermin, Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory, *Phys. Today*, April 1985.

{Me3} D. Mermin, Lettres et réponses dans *Physics Today*, December 1990.

{Me1} D. Mermin, *Boojums All the Way Through*, Cambridge University Press, Cambridge (1990).

{Me4} D. Mermin, Hidden variables and the two theorems of John Bell, *Rev. Mod. Phys.* 65, 803-815 (1993).

{O} 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).

{OP} S. Ortoli, J.P. Pharabod, *Le cantique des quantiques*, La Découverte, Paris (1984).

{Pa} A. Pais, Einstein and the quantum theory, *Rev. Mod. Phys.* 51, 863-914 (1979).

{Pe} R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford (1989).

{Pi} 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).

{Re} M. Redhead, *Incompleteness, Nonlocality and Realism*, Clarendon Press, Oxford (1987).

{SA} *Scientific American*, November 1979, p. 158.

{St1} H. Stapp, *Nuovo Cimento*, 40B, 191 (1977).

{St} H. Stapp, Bell's theorem and the foundations of quantum physics, *Amer. J. Phys.* 53, 306-317 (1985).

{BoF} J.P. Vigiier, 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).

{VN} J. von Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics, Princeton University Press, Princeton (1955).

{We} S. Weinberg, Dreams of a Final Theory, Vintage, London (1993).