

3- La non-localité et la théorie de Bohm

Jean Bricmont

1- La non-localité

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) [13] 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'autre¹. 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 »². 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 ».

Supposons 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

¹ Pour 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 actuelles, les distances sont de l'ordre de quelques kilomètres. 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.

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

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 droite³ ? Si l'on s'en tient à la description qui vient d'être donnée, la réponse est oui : avant la mesure (à gauche), le 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 même⁴.

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 questions⁵. Et, alors, il n'y a plus aucun mystère ni action à distance dans le fait que leurs réponses sont les mêmes. Et pour Einstein, Podolsky 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 inclus dans la fonction d'onde — soient accessibles à notre connaissance, que nous puissions les manipuler, les prédire, etc. C'est

³ Dans 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. Évidemment, 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 de 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 du formalisme quantique. Par conséquent, toute théorie ultérieure qui pourrait remplacer la mécanique quantique devra également être non-locale.

⁴ Il 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 ayant la faculté de raisonner dans des questions philosophiques ne pourra jamais y croire » (cité dans [20], 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 » (cité dans [23], p.121).

⁵ Le mot « instruction » est dû à Mermin [22]. 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.

simplement qu'elles existent. Qu'il y ait quelque chose dans le monde, un mécanisme, déterministe ou probabiliste peu importe, qui explique comment la source donne ces « instructions » aux particules. En fait, il y a une interprétation de la mécanique quantique qui est parfaitement compatible avec cette façon de voir les choses. On donne à la fonction d'onde un statut purement 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 sera la même à gauche et à droite, parce que les deux particules 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. Ce qu'il montre, c'est que de telles instructions ou « 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 obtient certains résultats statistiques⁶, également prédits par la mécanique quantique, et qui sont incompatibles avec la simple existence d'instructions expliquant la corrélation parfaite. Il faut souligner qu'ici on a affaire à une déduction purement mathématique⁷. De plus, comme ces prédictions de la mécanique quantique ont été vérifiées expérimentalement [1], 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-BeII. 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 » [2]⁸. 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 » aux vues de l'argument EPR. Et c'est cela qui est réellement surprenant dans le résultat de Bell.

⁶ Il existe une variante de l'argument de Bell [19], 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 encore été faite.

⁷ Qui est tellement simple qu'on peut en esquisser la démonstration : si les instructions existent, comme il n'y a que deux réponses (oui/non) pour trois « questions » ou positions (1, 2, 3), il faut nécessairement que, dans chaque expérience, au moins deux réponses à des questions différentes coïncident. Donc, si l'on additionne les fréquences avec lesquelles des réponses identiques apparaissent lorsqu'on pose des questions différentes, on obtient un nombre plus grand ou égal à 1. Or, pour des expériences quantiques appropriées, cette somme est égale à 3/4. D'où une contradiction.

⁸ Bell se plaint lui-même de ce que son théorème soit presque systématiquement interprété comme simplement une réfutation des théories de variables cachées, en oubliant les conséquences concernant la localité : « Mon premier article sur le sujet (*Physics* 1, 135 (1965)) commence par un résumé de l'argument EPR, déduisant de la localité les variables cachées déterministes. Mais les commentateurs ou presque universellement dit que cet article parlait de variables cachées déterministes » ([2], p.157).

Voici ce qu'il en dit lui-même : « Le malaise que je ressens vient de ce que les corrélations quantiques parfaites qui sont observées semblent exiger une sorte d'hypothèse « génétique » (des jumeaux identiques, qui ont des gènes identiques). Pour moi, il est si raisonnable de supposer que les photons dans ces expériences emportent avec eux des programmes, qui sont corrélés à l'avance, et qui dictent leur comportement. Ceci est si rationnel que je pense que, quand Einstein a vu cela et que les autres refusaient de le voir, il était l'homme rationnel. Les autres, bien que l'histoire leur ait donné raison, se cachaient la tête dans le sable. Je pense que la supériorité intellectuelle d'Einstein sur Bohr, dans ce cas-ci, était énorme ; un immense écart entre celui qui voyait clairement ce qui était nécessaire, et l'obscurantiste. Aussi, pour moi, il est dommage que l'idée d'Einstein ne marche pas. Ce qui est raisonnable simplement ne marche pas ». ([4], 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 ; le fait que « nous ne puissions pas éviter le fait que l'intervention d'un côté ait une influence causale de l'autre » ([2], 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 pas⁹. Premièrement, 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. 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

⁹ Le premier exemple est similaire à celui des chaussettes de M. Bertlmann [2], donné par Bell. Pour un exemple remarquable d'incompréhension de cet article, voir Gell-Mann, [15], p. 172.

un 1 à l'action du magicien, pendant une unité de temps, et un 0 à son absence d'action.

Ce qui est extraordinaire avec la non-localité quantique, c'est qu'elle a les trois premières propriétés « magiques » *mais pas la quatrième*. Les propriétés 2 et 3 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 pas les autres. De plus, cette action ne décroît pas en principe avec la distance, contrairement à toutes les forces connues en physique¹⁰. Finalement, cette action semble instantanée, en tout cas elle se propage plus vite que la vitesse de la lumière [1]. 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 [20], [21] 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 paranormaux¹¹.

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, aux vues des résultats expérimentaux.

De plus, il faut se garder de conclure que l'impossibilité d'envoyer des signaux signifie qu'il n'y ait 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 [21], les tremblements de terre ou le Big Bang ne sont pas contrôlables et ne permettent donc pas l'envoi de signaux, mais ce sont néanmoins des causes ayant certains effets. La notion de signal est bien 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. À un extrême, H. Stapp déclare que « le théorème de Bell est la plus profonde découverte de la science » [25] et un physicien de Princeton déclare « celui qui n'est pas dérangé par le théorème de Bell doit avoir des cailloux dans la tête » [22]. Mais l'indifférence est néanmoins la réaction la plus

¹⁰ Pourvu 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.

¹¹ Pour une bonne critique des pseudo-sciences, voir [8], et surtout [14] sur l'usage abusif de l'expérience EPR par des parapsychologues.

répandue. Mermin distingue différents types de physiciens [22] : 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.

Dans le premier cas, 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 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 » [7]. 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 »¹². [2]. 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 » ([10], p. 51). Évidemment, la mécanique quantique *prédit* les corrélations parfaites et imparfaites qui interviennent dans le raisonnement EPR-Bell. Mais est-ce que prédire équivaut à expliquer ? Pour comprendre la différence entre ces deux notions, 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. On donne à la fonction d'onde un statut physique et non simplement épistémique et l'on introduit deux types d'évolutions temporelles pour la fonction d'onde : l'évolution donnée par l'équation de Schrödinger en dehors des opérations de mesure et la « réduction » de la fonction d'onde, lorsqu'une mesure a lieu — la nécessité de l'introduction de cette double dynamique sera discutée dans la section suivante. Le problème est alors que l'opération de réduction est, dans la

¹² Et 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 ».

situation envisagée par EPR, manifestement non-locale. Il n'est simplement pas correct de dire que la mécanique quantique, telle qu'elle est présentée dans la plupart des manuels, est locale. Seule la partie « équation de Schrödinger » de la théorie l'est, pas la réduction.

Toute cette discussion montre que l'ambiguïté sur le statut de la fonction d'onde — moyen de calcul, objet réel ? — entretenue par une certaine tradition philosophique de type positiviste ou instrumentaliste a rendu difficile la compréhension de la non-localité.

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 [21] pour une discussion approfondie de ce problème —, mais il est clair qu'il y a un problème. Comme le dit Penrose : « Il y a un conflit entre notre image spatio-temporelle de la réalité physique — même l'image quantique non-locale qui est correcte — et la relativité restreinte ! » [24]. Mais, comme l'inégalité de Bell est interprétée en général de façon incorrecte, le problème du conflit — subtil mais réel — entre non-localité et relativité n'apparaît même pas. Néanmoins, il faut souligner que la simple existence d'une théorie quantique et relativiste des champs — dont les prédictions sont les plus spectaculairement vérifiées par l'expérience dans toute l'histoire des sciences — ne permet pas de nier le problème. En effet, la réduction de la fonction d'onde n'est nulle part traitée de façon relativiste. Et c'est *via* cette opération que la non-localité s'introduit de façon explicite dans le formalisme quantique.

2- Le problème de la mesure et la théorie de Bohm

Il y a plusieurs façons d'énoncer le « problème de la mesure » en mécanique quantique. La façon la plus traditionnelle est de partir de l'existence de superpositions macroscopiques, qui suit inéluctablement de la description quantique du processus de mesure, c'est-à-dire d'une description qui applique les raisonnements quantiques aux appareils de mesure eux-mêmes. L'expression « raisonnements quantiques » renvoie à l'idée que la fonction d'onde donne une description complète de l'état du système et que son évolution est donnée uniquement par l'équation de Schrödinger¹³.

Rappelons brièvement l'argument, qui remonte à von Neumann : supposons que l'on mesure le spin d'une particule dans une direction donnée. Si la fonction d'onde de la particule est initialement « *up* » dans cette direction, et l'appareil de mesure initialement dans un état « neutre », la mesure induira un couplage entre les deux systèmes — dont on n'a nullement besoin de connaître les détails — et le résultat sera une fonction d'onde combinée indiquant que le spin de la particule est

¹³ C'est-à-dire sans introduire dès le départ la réduction de la fonction d'onde.

toujours « *up* », et que l'appareil a détecté une particule ayant un spin « *up* ». La même chose est vraie, *mutatis mutandis*, pour le spin « *down* ». Maintenant surgit le problème : si l'on part d'une particule qui est dans une superposition de *spin up* et de *spin down*, alors la simple linéarité des lois d'évolution quantique implique que l'appareil de mesure sera dans une superposition d'état « ayant détecté un *spin up* » et « ayant détecté un *spin down* ». Or cela, nous ne l'observons jamais. Pour le dire d'une façon un peu brutale, mais correcte, la mécanique quantique fait une prédiction non ambiguë qui se révèle fautive ; donc, elle doit être rejetée. Néanmoins, vu le succès spectaculaire de la mécanique quantique, il serait déraisonnable de la rejeter purement et simplement. Mais il faut la modifier d'une façon ou d'une autre.

On peut, en gros, suivre deux voies pour sortir de cette impasse. L'une, c'est de considérer que l'évolution quantique n'est pas toujours respectée, l'autre, c'est de dire que la fonction d'onde ne décrit pas entièrement le système. On pourrait sans doute montrer comment les adeptes de l'interprétation de Copenhague se rallient en fait à une de ces deux solutions, en dépit des grandes proclamations philosophiques qui tentent de nier l'existence même d'un problème. Si l'on soutient par exemple qu'il est irréaliste d'attribuer une fonction d'onde à l'appareil de mesure, cela veut dire que la fonction d'onde ne décrit pas entièrement tous les systèmes physiques. Même chose si l'on soutient une interprétation épistémique de la fonction d'onde, c'est-à-dire que celle-ci représente la *connaissance* que nous avons du système. Si, par contre, on introduit la réduction de la fonction d'onde, alors on admet implicitement que l'évolution de Schrödinger n'est pas toujours valable. *Idem* si l'on introduit une distinction nette et irréductible entre classique et quantique ou microscopique et macroscopique.

Si l'on cherche à remplacer l'évolution de Schrödinger par une opération non-linéaire ou stochastique, celle-ci devrait avoir deux propriétés : être suffisamment bien approximée par l'évolution de Schrödinger, lorsqu'on discute d'un petit nombre de particules, de façon à ce que les prédictions de la mécanique quantique restent vraies pour la nouvelle théorie, et se ramener, lorsque l'on s'intéresse à un grand nombre de particules — par exemple, à un appareil de mesure —, essentiellement à la réduction. Vu la difficulté mathématique inhérente au traitement d'équations non-linéaires, le fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de théories satisfaisantes de ce type ne peut pas être considéré comme un argument très fort contre cette suggestion. De plus, comme la plupart des physiciens considèrent la mécanique quantique ordinaire comme acceptable, peu d'essais, en fin de compte, ont été faits. Roger Penrose encourage cette approche au moyen de l'analogie suivante : « 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 » [24]. Signalons qu'à défaut d'une théorie non-linéaire, il existe une théorie stochastique, où la fonction d'onde est réduite aléatoirement, avec une faible probabilité pour un système microscopique, à tout moment. Mais, quand on considère un grand nombre de particules, comme dans un appareil de mesure, la probabilité d'une réduction devient grande. Cette théorie, appelée « GRW » d'après les noms de ses auteurs — Ghirardi, Rimini et Weber — est, dans sa formulation actuelle, fort *ad hoc*, mais a néanmoins le mérite de résoudre le problème de la mesure : les « sauts quantiques » qui se produisent partout et tout le temps sont simplement amplifiés à cause du caractère nécessairement macroscopique de l'appareil de mesure.

Si l'on veut, au contraire, une théorie où la description complète de l'état du système ne se réduise pas à la fonction d'onde, il faut faire attention à différents théorèmes qui montrent que donner à un certain ensemble de variables une valeur avant toute « mesure » est tout aussi impossible — et pour des raisons similaires — que d'introduire des variables « cachées » qui sauveraient la localité¹⁴.

Il existe néanmoins, depuis 1952, une théorie qui résout le problème de la mesure et échappe à toutes ces impossibilités, de façon très naturelle : la théorie de Bohm. Dans cette théorie, la description complète de l'état du système est donnée à la fois par la fonction d'onde habituelle et par les positions de toutes les particules. Ces dernières sont ce que Bell appelle les « *beables* » de la théorie, c'est-à-dire ce qui existe, par opposition aux simples observables. La dynamique est donnée par deux équations : d'une part, l'évolution habituelle de Schrödinger, qui détermine comment évolue la fonction d'onde et d'autre part l'équation de Bohm, qui détermine comment les particules sont guidées par l'onde.

La théorie est parfaitement déterministe et l'accord avec l'expérience s'obtient en postulant que les positions initiales du système sont distribuées aléatoirement et que cette distribution initiale coïncide avec le carré de la valeur absolue de la fonction d'onde, c'est-à-dire la distribution de Born. La dynamique de la théorie de Bohm possède en effet une propriété remarquable, dite d'équivariance, qui signifie que, si la distribution initiale coïncide avec celle de Born, alors elle coïncidera avec elle à tous les temps ultérieurs — pour la nouvelle fonction d'onde obtenue en appliquant l'évolution de Schrödinger à la fonction d'onde initiale. On peut évidemment s'interroger sur la justification du choix de la distribution initiale, qui est une question complexe¹⁵. Remarquons néanmoins qu'ici le caractère apparemment « aléatoire » des résultats expérimentaux s'explique, comme pour des systèmes dynamiques classiques, par exemple « chaotiques », au moyen d'une hypothèse sur les conditions initiales, alors que, dans l'interprétation traditionnelle, ce caractère aléatoire n'est pas expliqué du tout.

¹⁴ Voir [9] pour une discussion plus approfondie de ces théorèmes.

¹⁵ Voir [11] pour une discussion plus approfondie de cette question.

La théorie de Bohm possède deux autres qualités importantes. D'une part, non seulement elle échappe à tous les théorèmes d'impossibilité sur les variables cachées, mais elle permet de comprendre intuitivement l'origine de ces théorèmes. Il n'y a pas de « variables cachées » dans cette théorie, autres que les positions¹⁶. Il n'y a pas de valeur assignée par le système à des opérateurs tels que le moment, le spin, le moment angulaire, etc., valeur qui serait déterminée avant ces interactions spécifiques avec des dispositifs macroscopiques appelés « appareils de mesure ». On peut, dans la théorie de Bohm, analyser comment ces interactions ont lieu¹⁷ et voir que le résultat ne dépend pas seulement de l'état complet du système microscopique mais aussi de la disposition particulière de l'appareil. Donc, toute « mesure » de quelque observable que ce soit, sauf la position, est une *interaction authentique* entre le système et l'appareil. Elle ne révèle pas simplement des propriétés préexistantes du système et ne devrait donc pas être appelée « mesure ». On pourrait aussi dire que — suprême ironie de l'histoire — la théorie de Bohm rend concrète et mathématiquement précise l'intuition de Bohr concernant l'impossibilité de séparer le système et l'appareil.

La non-localité est, d'autre part, aussi facile à comprendre dans la théorie de Bohm. L'observation de base est que la fonction d'onde est une fonction définie sur l'espace de configuration et non, comme, par exemple, le champ électromagnétique, sur l'espace physique. Considérons deux particules et supposons qu'il y ait un potentiel localisé dans le voisinage de l'origine, et correspondant à l'introduction d'un dispositif de mesure agissant sur la première particule. L'évolution de la fonction d'onde sera affectée par le potentiel *via* l'équation de Schrödinger ; cependant, la fonction d'onde détermine les trajectoires des deux particules *via* l'équation de Bohm. Donc, la trajectoire de la seconde particule sera aussi (indirectement) affectée par le potentiel (c'est-à-dire le dispositif de mesure), même s'il arrive qu'elle soit très éloignée de l'origine. Ceci donne une certaine compréhension de ce qui se passe quand la polarisation ou les « mesures » du spin sont accomplies sur des paires (anti-)corrélées. Les résultats, comme le montre Bell, ne sont pas déterminés avant l'interaction avec un dispositif de mesure. Et c'est pourquoi les parfaites corrélations sont dues à une forme subtile de « communication » entre les deux côtés de l'expérience. Cette dernière est rendue possible parce que la fonction d'onde met en connexion des parties distantes de l'univers grâce à l'équation de Bohm.

¹⁶ Appeler les positions des variables cachées est, comme dit Bell, une idiotie héritée de l'histoire ([3], p. 163). On appelle traditionnellement variables cachées tout ce qui ne se réduit pas à la fonction d'onde. Mais les positions sont les seules variables qui sont réellement visibles : la vitesse d'une voiture se mesure par la position d'une aiguille sur un cadran et on peut facilement voir qu'en général toutes les « mesures » peuvent être ramenées à des mesures de positions. Par contre, la fonction d'onde est « cachée », en ce sens que nous inférons ses propriétés à partir des mesures faites antérieurement sur le système.

¹⁷ Voir [9], [16] [3], chap. 17 pour plus de détails.

Une remarque finale : les objections les plus courantes contre la théorie de Bohm concernent son caractère « métaphysique » et « non-local, donc incompatible avec la relativité ». Je laisse de côté la première objection, qui reflète une certaine incompréhension de type « positiviste » concernant la nature des théories physiques. Mais la seconde objection est étrange : après tout, ce que le théorème de Bell montre, c'est qu'une théorie qui fait des prédictions expérimentales correctes doit être non-locale. Être non-locale devrait être considéré, pour une théorie, comme une vertu indispensable plutôt que comme un défaut. Et, en ce qui concerne la compatibilité avec la relativité, les problèmes rencontrés par la théorie de Bohm sont essentiellement les mêmes que ceux que rencontrerait toute théorie qui ferait des prédictions correctes¹⁸.

3- Conclusions

Je laisserai le dernier mot à John Bell, l'un des plus lucides défenseurs de la théorie de Bohm. Il explique que, lorsqu'il était étudiant, il avait lu le livre de Born [6], où, sur la base d'une mauvaise compréhension de la signification du théorème sur les variables cachées de von Neumann, il était déclaré qu'une théorie déterministe sous-jacente à l'algorithme quantique était impossible¹⁹. Mais, comme il le dit, « en 1952, je vis l'impossible accompli » ; et c'était la théorie de Bohm. Il continue : « Mais alors pourquoi Born ne m'avait pas parlé de cette « onde-pilote » ? Ne serait-ce que pour signaler ce qui n'allait pas avec elle ? Pourquoi von Neumann ne l'a pas envisagée ? Plus extraordinaire encore, pourquoi des gens ont-ils continué à produire des preuves d'impossibilité, après 1952, et aussi récemment qu'en 1978 ? Alors que même Pauli, Rosenfeld, et Heisenberg, ne pouvaient guère produire de critique plus dévastatrice de la théorie de Bohm que de la dénoncer comme étant « métaphysique » et « idéologique » ? Pourquoi l'image de l'onde-pilote est-elle ignorée dans les cours ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique solution, mais comme un antidote à l'auto-satisfaction dominante ? Pour montrer que le flou, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposés de force par les faits expérimentaux, mais proviennent d'un choix théorique délibéré ? »²⁰

¹⁸ Voir [3] (chap. 19), [12], [21] pour une discussion plus détaillée de la relativité et des théories du champ quantique bohmien.

¹⁹ Voir [17] pour de nombreux exemples d'incompréhensions de la signification de ce théorème, incompréhensions qui remontent à von Neumann lui-même.

²⁰ Bell, [3] p. 160.

Références

- 1- A.Aspect, J.Dalibard, G.Roger, *Phys.Rev.Lett.* 49, 1804 (1982).
- 2- J.S.Bell, « Bertlmann' socks and the nature of reality », Chapitre 16 dans [3].
- 3- J.S.Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 1987.
- 4- J.Bernstein, *Quantum Profiles*, Princeton University Press, Princeton (1991).
- 5- D. Bohm, "A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden variables", Parts 1 and 2, *Phys. Rev.* 89, (1952) p. 166-193.
- 6- M. Born, *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Clarendon, Oxford (1949).
- 7- M.Born (ed.), *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, Londres (1971).
- 8- H.Broch, *Au cœur de l'extraordinaire, l'Horizon chimérique*, Bordeaux (1992).
- 9- M. Daumer, D.Dürr, S.Goldstein, N.Zanghi, « Naive realism about operators", *Erkenntnis* 45, (1996) 379-397, quant-ph/9601013.
- 10- P.C.W.Davies, J.R.Brown (eds), *The Ghost in the Atom* (BBC interviews), Cambridge University Press, Cambridge 1989.
- 11- D. Dürr, S. Goldstein, N. Zanghi, "Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty", *J. Stat. Phys.* 67 (1992) 843-907
- 12- D. Dürr, S. Goldstein, K. Münch-Berndl, N. Zanghi, „Hypersurface Bohm- Dirac Models“, *Phys. Rev. A* 60, (1999) 2729-2736, quant-ph/9801070
- 13- A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, "Can quantum mechanical description of reality be considered complete?", *Phys. Rev.* 47 (1935) 777-780.
- 14-M. Gardner, *The New Age, Notes of a Fringe Watcher*, Prometheus Books, Buffalo (1988).
- 15- M. Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar*, Little, Brown and Co., London (1994).
- 16- S. Goldstein, Bohmian, "Mechanics and the Quantum Revolution", *Synthese* 107,145-165 (1996).
- 17- S. Goldstein, "Quantum Philosophy: The Flight from Reason in Science, contribution to *The Flight from Science and Reason*", P. Gross, N. Levitt, and M.W.Lewis, eds., *Annals of the New York Academy of Sciences* 775,119-125 (1996), quant-ph/9601007
- 18- S. Goldstein, "Quantum theory without observers", *Physics Today*, March 1998 (p. 42-46)-April 1998 (p. 38-42) ; voir aussi *Physics Today*, Letters, February 1999 (p. 11).
- 19- D. Greenberger, M.Horne, A.Shimony, Z.Zeilinger, *Am.J. of Phys.* 58, 1131 (1990).
- 20-N. Herbert, *Quantum Reality*, Anchor Press, Garden City (1985).
- 21-T. Maudlin, *Quantum Non-Locality and Relativity*, Blackwell, Cambridge (1994).
- 22-D. Mermin, *Physics Today*, Avril 1985.
- 23-D. Mermin, *Boojums All the Way Through*, Cambridge University Press, Cambridge 1990. 22 -A.Pais, *Rev.Mod.Phys.* 51, 863 (1979).
- 24-R. Penrose, *The Emperor's New Mind*, Oxford University Press, Oxford 1989.
- 25-H. Stapp, *Nuovo Cimento* 40b, 191 (1987).