

5- Mécanique quantique et connaissance du réel

Hervé Zwirn

Introduction

Les problèmes d'interprétation de la mécanique quantique conduisent à s'interroger sur le statut de la réalité et de la relation entre les systèmes physiques et leurs observateurs. En particulier, les difficultés rencontrées dans le problème de la mesure quantique ont amené certains physiciens à postuler une mystérieuse action de la conscience sur la matière. Des travaux datant d'il y a une vingtaine d'années apportent une solution nouvelle au problème. La portée philosophique de cette solution dépend cependant des positions initiales qu'on adopte face au réalisme. Dans ce qui suit, on présentera d'abord le problème de la mesure et les anciennes solutions. Puis, on examinera en quoi la nouvelle solution permet d'éviter tout paradoxe. Enfin on s'interrogera sur les conséquences de cette solution sur le réalisme.

I. Trois principes fondamentaux de la mécanique quantique

I.1. Le principe de superposition

La mécanique quantique postule que les états d'un système physique donné forment un espace vectoriel (plus précisément un espace de Hilbert). La conséquence en est que toute combinaison linéaire d'états possibles est elle-même un état possible. Si, par exemple, on se contente de caractériser l'état d'une particule par sa position et qu'on note $|x\rangle$ (resp $|y\rangle$) l'état de la particule à la position x (resp y), alors l'état $1/\sqrt{2} [|x\rangle + |y\rangle]$ est un état possible. Un tel état est appelé un état superposé. Quelle position occupe une particule dans cet état ? Est-elle en x , en y , au milieu, ou oscille-t-elle entre les deux positions ?

I.2 Le principe de réduction du paquet d'ondes

La réponse est apportée par le principe de réduction du paquet d'ondes (PRPO) qui régit le processus de mesure en prédisant ce qu'on observera si on mesure telle grandeur physique sur un système dont on connaît l'état. Ainsi, PRPO nous dit que si on mesure la position d'une particule dans l'état $1/\sqrt{2} [|x\rangle + |y\rangle]$, on observera la particule à la position x avec une probabilité de $1/2$ et idem pour la position y . Il en résulte que si on mesure la position d'un grand nombre N de particules dans cet état, on en observera en gros la moitié en x et l'autre moitié en y . Il est alors tentant d'interpréter cela comme signifiant que l'état superposé $1/\sqrt{2} [|x\rangle + |y\rangle]$ est la représentation d'un mélange de particules dont une moitié est en x et une moitié est en y et ce, dès avant la mesure qui ne serait qu'un constat a posteriori. Dans ce cas, l'état en question représenterait un mélange de $N/2$ particules dans l'état $|x\rangle$ et $N/2$ particules dans l'état $|y\rangle$. Cette interprétation n'est cependant pas tenable car il est

possible de montrer qu'un ensemble de particules, dans l'état superposé, se comporte sous certains aspects de manière différente de celle d'un mélange de particules. L'état superposé n'est donc pas identique à un mélange de particules occupant une position bien définie x ou y . La conséquence est qu'on doit considérer qu'avant la mesure, une particule dans l'état superposé ne possède aucune position définie et que c'est le processus de mesure qui force la position à adopter une valeur précise. Cette conclusion est tout à fait générale et s'applique à toutes les grandeurs physiques : un système dans un état qui est une superposition d'états correspondants chacun à des valeurs bien définies pour certaines grandeurs physiques, ne peut être considéré comme possédant une valeur définie pour ces grandeurs. Ceci est bien évidemment radicalement différent de ce qui se passe en mécanique classique où les valeurs des grandeurs physiques attachées au système sont bien définies à tout moment. En général, seules des prédictions probabilistes sur les valeurs que fournira la mesure et sur l'état final correspondant sont possibles.

I.3 L'équation de Schrödinger

En l'absence de toute mesure, l'état d'un système évolue conformément à l'équation de Schrödinger (ES) :

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi = H \psi$$

où \hbar est la constante de Planck et H est l'opérateur hamiltonien associé à l'énergie du système.

II. Le problème de la mesure

On se trouve en présence de deux postulats d'évolution. Le premier (PRPO) doit être utilisé lorsqu'on fait une mesure, le deuxième (ES) doit l'être en l'absence de mesure. Ceci serait parfaitement acceptable s'il était possible de spécifier ce qu'est une mesure de manière non ambiguë. Malheureusement, on peut voir que tel n'est pas le cas. Pour cela, considérons un système S sur lequel on fait une mesure à l'aide d'un appareil A . Deux points de vue apparemment équivalents sont possibles pour décrire cette mesure :

- a) Si l'on s'intéresse à l'état E_S du système S , le principe de réduction du paquet d'ondes prescrit comment celui-ci peut évoluer après la mesure. Supposons que la mesure a lieu à l'instant t . Si avant la mesure, l'état est $E_S(i)$, celui-ci deviendra après la mesure $E_S(f_1)$ ou $E_S(f_2)$ (on se rappelle que plusieurs résultats de mesure sont possibles en général et on se limitera ici à deux sans perte de généralité).
- b) Considérons maintenant le grand système constitué du système S et de l'appareil A . La mécanique quantique nous apprend que si E_S est l'état du système S et E_A l'état de l'appareil A , l'état du système sera $S = E_S E_A$. Avant l'instant t , cet état sera donc $E_S(i) E_A(i)$. Le système

n'est lui soumis à aucune mesure. Son état évolue donc conformément à l'équation de Schrödinger et il est possible de le calculer après l'instant t .

Le point important est qu'on peut montrer que le calcul par l'équation de Schrödinger ne permettra jamais de retrouver pour S un résultat identique ni à $E_S(f_1)$ ni à $E_S(f_2)$. Les deux points de vue, qui semblent aussi légitimes l'un que l'autre, conduisent à des prédictions irréconciliables. Le premier point de vue aboutit à considérer qu'après la mesure le système S est dans un état où la grandeur mesurée possède une valeur définie. Dans le deuxième point de vue, l'état final du grand système est un état superposé où l'appareil A et le système S sont « enchevêtrés ». La valeur de la grandeur physique n'est pas définie. L'apparente contradiction entre les deux principes d'évolution est ce qu'on appelle le problème de la mesure.

III. Les premières solutions

III.1 Bohr et l'école de Copenhague

Pour résoudre cette difficulté, Bohr fait remarquer qu'en pratique, on sait très bien quand on fait une mesure et le résultat n'est jamais un état superposé mais toujours un état où la grandeur mesurée possède une valeur bien définie. Il n'y a donc aucune ambiguïté sur le fait qu'il faut utiliser le principe de réduction du paquet d'ondes. Selon la position de l'école de Copenhague, la science a pour objet de donner un langage descriptif et des moyens de prédire les résultats d'observation. En pratique, on sait qu'une observation fait intervenir un appareil macroscopique et lorsqu'on procède ainsi on doit utiliser PRPO. Cette position à tendance positiviste est cohérente, mais elle conduit à renoncer à se poser certaines questions comme « quelle est la position d'une particule qu'on n'observe pas ? ». De plus, elle n'explique pas pourquoi les deux points de vue donnent des résultats différents. La mécanique quantique est une théorie qui s'applique en principe aussi bien aux objets microscopiques que macroscopiques. Le fait que le deuxième point de vue, tout aussi légitime a priori, ne donne pas le bon résultat reste un mystère.

III.2 Von Neumann, London et Bauer, Wigner

Pour tenter de pousser plus loin l'analyse, on peut remarquer qu'il est possible d'étendre le deuxième point de vue en incluant l'observateur lui-même dans le grand système. Dans ce cas, la conclusion qui suivra est que l'observateur doit aussi être dans un état superposé enchevêtré avec le système et l'appareil. L'observateur est constitué de parties physiques (œil, nerf optique, cerveau etc.) et, de manière ultime, d'une conscience. La mesure se termine par la prise de conscience du résultat par l'observateur. C'est cette remarque que von Neumann, London et Bauer, Wigner ont utilisée pour proposer une solution. Selon eux, la conscience n'est pas une composante physique, elle échappe donc à la description de la mécanique quantique. Ce constat leur permet de supposer que

c'est la prise de conscience de l'observateur qui est responsable de la réduction du paquet d'ondes. C'est donc en quelque sorte l'action de la conscience sur le système qui force celui-ci à adopter un état où la grandeur physique possède une valeur définie.

Cette solution rencontre toutefois un certain nombre de difficultés. Tout d'abord, elle introduit un dualisme gênant : à côté des objets du monde physique, existeraient des consciences qui n'en feraient pas partie mais seraient cependant susceptibles d'avoir une action directe sur les objets physiques. La nature de cette action paraît pour le moins mystérieuse. On se rappelle que Descartes avait défendu une position analogue qui a été abandonnée depuis longtemps. Ensuite, surgissent un grand nombre de questions étranges : si c'est la prise de conscience qui crée la valeur de la grandeur physique — comme, par exemple, la position d'une particule — que vaut la grandeur si personne n'observe ? Si on répond que la grandeur n'a aucune valeur, alors il faut en conclure que la lune n'avait aucune position définie avant que quelqu'un ne l'observe ! Qu'en est-il de l'univers avant l'apparition d'êtres conscients ? Par ailleurs, la conscience d'un singe peut elle aussi réduire le paquet d'ondes ? Et celle d'un chien ou d'une mouche ? L'absurdité de ces questions nous rend suspicieux sur cette solution. Remarquons de plus que cette solution prend place dans le cadre d'un réalisme naïf. On considère que les objets existent en soi et que la conscience a une action objective sur eux. La réduction du paquet d'ondes par action de la conscience modifie objectivement l'état du système qui passe d'un état superposé à un état où la grandeur observée a une valeur bien définie.

III.3 La théorie des états relatifs d'Everett (théorie des univers parallèles)

Une autre solution a été proposée par Hugh Everett. Elle consiste à supposer que la fonction d'ondes n'est jamais réduite et reste toujours superposée. L'état de l'observateur est lui aussi un état superposé comme le prescrit l'équation de Schrödinger. Pourquoi alors avons-nous conscience d'observer des états réduits ? Parce qu'à chaque mesure, l'observateur lui-même se scinde en autant d'observateurs différents qu'il existe de possibilités différentes de résultats et dans chaque branche, la conscience de l'observateur voit la partie réduite correspondante. En dehors de son étrangeté, cette solution n'est pas exempte de difficultés comme celle que pose la mesure du spin d'une particule provenant de la désintégration d'un système de deux particules dans un état singulier de spin. Comme l'a fait remarquer d'Espagnat, en raison de la symétrie sphérique du problème, il faudrait supposer une infinité continue d'univers parallèles, ce qui est extrêmement peu satisfaisant.

IV. La théorie de la décohérence

IV.1 La solution

La solution est venue d'une remarque de Zeh dans les années 70 qui fit remarquer que les niveaux d'énergie des systèmes macroscopiques sont tellement proches les uns des autres que même de toutes petites fluctuations peuvent les affecter. Ils ne peuvent donc jamais être considérés comme réellement isolés de leur environnement. Il en résulte que dans ce que nous avons appelé le deuxième point de vue lors d'une mesure, le grand système doit inclure aussi cet environnement. Il faut donc appliquer l'équation de Schrödinger à la fonction d'ondes du système S, de l'appareil A et de l'environnement E. On aboutit alors après l'instant t , à un état enchevêtré du système, de l'appareil et de l'environnement. Apparemment il semble qu'on n'y gagne rien. Cependant, lors d'une mesure, on se contente en fait, d'observer le système et l'appareil et on laisse de côté l'environnement. La raison en est d'une part que l'environnement ne nous intéresse pas et d'autre part, qu'on serait bien incapable de mesurer les grandeurs attachées à ses différentes composantes ; qu'on pense au nombre faramineux de molécules d'air dans une pièce ! On sépare donc le système et l'appareil de leur environnement. Or, la mécanique quantique nous dit que lorsqu'on ne s'intéresse qu'à un sous-système d'un grand système, il est possible d'obtenir son état à partir de l'état du grand système en faisant une opération mathématique — qui s'appelle « prendre la trace partielle » — sur l'état global. Et c'est là que la suggestion de Zeh montre sa pertinence, puisqu'il est possible de montrer — Zurek a été un des premiers à le faire au début des années 80 — que l'état ainsi obtenu est identique — à certaines réserves près que nous verrons plus loin — à celui qu'on obtient par le principe de réduction du paquet d'ondes. L'évolution par l'équation de Schrödinger et celle par le principe de réduction du paquet d'ondes sont enfin réconciliées.

IV.2 Les réserves

La théorie de la décohérence est une énorme avancée dans la résolution du problème de la mesure. Peut-t-on considérer qu'elle est la solution définitive du problème ? C'est la position de nombreux physiciens, mais la réponse dépend en grande partie de la position philosophique de base qu'on adopte. Pour comprendre pourquoi la réponse n'est pas immédiate, il faut maintenant expliciter certains points que nous n'avons pas mentionnés plus haut. Tout d'abord, l'état qu'on obtient pour le système et l'appareil par l'utilisation de la décohérence n'est pas exactement identique à celui qu'on obtient par application du principe de réduction du paquet d'ondes. Même s'il en est très proche, il en diffère de deux manières. Le principe de réduction du paquet d'ondes nous dit que l'appareil et le système seront après la mesure dans des états macroscopiquement bien définis, avec une certaine probabilité pour chaque état si plusieurs résultats sont possibles. Ceci signifie que toute corrélation entre les différents états aura disparu. La décohérence nous dit que les corrélations entre les différents états possibles deviennent très rapidement négligeables, mais en

toute rigueur, ces corrélations ne disparaissent pas totalement. Simplement, elles deviennent trop faibles pour être mesurables. Par ailleurs, si on s'intéresse à un système unique et non pas à un ensemble de systèmes, l'état qu'on obtient après décohérence doit être interprété comme le fait que le système est dans une sorte de coexistence, sans corrélation, des différents états possibles plutôt que comme dans un seul état choisi parmi les états possibles. Cette difficulté, appelée problème du « ou-et » par Bell est subtile et nous la laisserons de côté ici. Il nous suffit de signaler que ces deux différences entre les états produits par application de la décohérence et ceux produits par application du principe de réduction montrent que la réponse n'est pas si immédiate que certains physiciens paraissent le croire.

IV.3 Aspects philosophiques du problème

Nous avons dit plus haut que la réponse dépend de la position philosophique qu'on adopte. Nous allons voir maintenant pourquoi. Selon le mécanisme de décohérence, le système, l'appareil et l'environnement s'enchevêtrent et seul le grand système composé des trois parties possède un état. Ce n'est que parce que nous sommes, en tant qu'êtres humains, incapables de prendre conscience — c'est-à-dire de mesurer — des corrélations entre l'appareil et les composantes de l'environnement que nous devons prendre la trace partielle de l'état global pour décrire ce que nous observons en pratique. En d'autres termes, cette opération — qui donne comme nous l'avons vu un résultat proche de celui du PRPO — nous donne une description de l'apparence pour nous de l'appareil et du système. L'appareil et le système nous apparaissent comme étant dans un état macroscopiquement bien défini. Mais si nos capacités perceptives nous permettaient de prendre conscience des corrélations avec l'environnement, nous « observerions » qu'aussi bien l'appareil que le système sont dans un état enchevêtré avec l'environnement et nullement dans un état réduit. L'apparence de nos observations vient de notre incapacité pratique à effectuer certaines mesures. Il en résulte que pour celui qui considère que la réalité est indépendante de nos perceptions — réaliste métaphysique — ou au moins ne doit pas dépendre de nos capacités perceptives pratiques — réaliste empirique de principe —, la décohérence donne une explication de l'apparence de cette réalité pour nous et n'est pas un mécanisme qui projette objectivement les états superposés en états macroscopiquement définis. Pour de tels réalistes, la réalité reste profondément quantique et seule l'apparence de cette réalité est classique. En revanche, pour celui qui considère que la seule réalité est celle des perceptions pratiquement réalisables — réaliste empirique pragmatique —, la décohérence est la solution définitive du problème de la mesure car il est dépourvu de sens de s'interroger sur des mesures que nous ne pouvons réaliser. Il est intéressant de remarquer que la décohérence continue à faire jouer à la conscience un rôle essentiel. Mais à la différence de celui que von Neumann ou Wigner voulaient lui attribuer, il ne s'agit plus d'action objective directe de la conscience sur la matière. La conscience devient seulement l'aune à laquelle on mesure la réalité. Pour un réaliste métaphysique, la conscience prescrit la forme que revêt pour nous une réalité qui nous dépasse, pour un réaliste empirique pragmatique, la conscience définit ce qu'est la réalité.

IV.4 Le solipsisme convivial

À la suite de Bernard d'Espagnat qui a proposé une interprétation permettant de résoudre les problèmes soulevés par la théorie des états relatifs d'Everett, j'ai développé une position, le solipsisme convivial, qui s'intègre dans le cadre de la théorie de la décohérence. Cette position suppose qu'on refuse de se placer dans le cadre du réalisme empirique pragmatique. Bien que défendant par ailleurs une position différente qu'il serait trop long de détailler ici, je me placerai ici dans le cadre du réalisme métaphysique. La décohérence est alors le mécanisme qui explique l'apparence classique pour nous d'une réalité qui demeure essentiellement quantique, c'est-à-dire enchevêtrée. Le solipsisme convivial fait entrer l'observateur lui-même dans le grand système. Le raisonnement que nous avons décrit conduit alors à considérer que l'observateur est aussi dans un état enchevêtré avec le système, l'appareil et l'environnement. Du point de vue de la réalité profonde (et non de l'apparence de cette réalité pour nous), seule une fonction d'ondes globale superposée « existe ». Dans cette fonction d'ondes, les différents résultats possibles de mesure sont présents et sont corrélés ainsi que tous les états correspondants de l'observateur. La décohérence intervient et permet de régler un certain nombre de problèmes que nous n'avons pas eu la possibilité d'évoquer : quelle est la grandeur mesurée par exemple, ce qui a pour effet de résoudre la difficulté que nous avons signalée à propos de l'interprétation d'Everett. Le solipsisme convivial consiste alors à considérer que la conscience de l'observateur est « accrochée » à l'une des branches de la fonction d'ondes ne lui permettant d'observer que la partie classique correspondante. La conscience joue en quelque sorte le rôle d'un filtre ne permettant de voir qu'une partie de la fonction d'ondes globale. Une définition précise de ce processus permet de montrer que les prédictions habituelles de la mécanique quantique sont respectées malgré le fait que la fonction d'ondes n'est jamais rigoureusement réduite. Le point surprenant est alors que rien n'oblige deux observateurs différents à être accrochés à la même branche. Pour une mesure donnée, un observateur peut être accroché à la branche donnant le résultat A alors qu'un autre le sera à la branche donnant le résultat B. Comment peut-il en être ainsi alors qu'on sait que deux observateurs de la même expérience sont — en général — d'accord sur le résultat ? La raison en est que la communication entre observateurs est elle-même un processus de mesure et que le mécanisme d'accrochage garantit la cohérence des observations pour un observateur. Supposons qu'André a observé le résultat A et Bernard le résultat B. Les deux observations ne sont que l'accrochage de la conscience d'André et de Bernard à leur branche propre de la fonction d'ondes globale qui contient les deux possibilités. Si André demande à Bernard ce qu'il a vu, l'interaction entre André et Bernard qui en résulte contient la totalité des possibilités, donc à la fois une branche où Bernard répond A et une branche où Bernard répond B. La fonction d'ondes d'André sera après l'interaction avec Bernard dans un état enchevêtré contenant les deux réponses mais la conscience d'André s'accrochera à la branche correspondant à la réponse cohérente avec son observation précédente, il entendra donc Bernard répondre A conformément à son attente. C'est la raison pour laquelle cette interprétation porte le nom de solipsisme convivial : chaque

observateur vit dans son monde qui peut être totalement différent de celui des autres, mais il n'existe aucun moyen de se rendre compte des désaccords et les observateurs sont en parfait accord. Ceci fournit une nouvelle explication de l'intersubjectivité : il n'y a aucun moyen de constater un désaccord. Signalons pour terminer une conséquence étrange sur l'indéterminisme de la mécanique quantique. La fonction d'ondes de l'Univers évolue de manière parfaitement déterministe par l'équation de Schrödinger, seul le mécanisme d'accrochage tire au sort la branche à laquelle chaque observateur s'accroche. Ce n'est donc plus Dieu qui joue aux dés, c'est l'homme, mais avec le constat étrange que deux joueurs peuvent voir le même dé tomber sur une face différente.

Bibliographie sommaire

- BELL J.S., (1964) *Physics 1*, 195.
BELL J.S., (1987) *"Speakable and unspeakable in quantum mechanics"*, Cambridge University Press.
BELL J.S., (1990) *"Against Measurement"*, in *Sixty Two Years of Uncertainty*, A.I. Miller ed., New York, Plenum Press.
ESPAGNAT d' B., (1976) *"Conceptual Foundations of Quantum Mechanics"*, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1971, 2^e ed 1976.
ESPAGNAT d' B., (1979) *"A la recherche du réel"*, Gauthier-Villars, Paris.
ESPAGNAT d' B., (1980) *"Théorie quantique et réalité"*, Pour la Science, n°27, janvier 1980.
ESPAGNAT d' B., (1985) *"Une incertaine réalité"*, Gauthier-Villars, Paris.
ESPAGNAT d' B., (1994) *"Le réel voilé"*, Fayard, Paris.
ESPAGNAT d' B., (1997) *"Physique et réalité"*, Bitbol et Laugier ed., Editions Frontières.
EVERETT III H., (1957) *Rev. Mod. Phys.*, 29, 463
WHEELER J.A., ZUREK W., (1983) *"Quantum Theory and Measurement"*, Princeton University Press.
ZEH H., (1970) *Foundations of Physics*, 1, 67.
ZEH H., (1995) in *"Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory"*, Giulini D. et al., Springer.
ZUREK W., (1981) *Phys. Rev. D*24, 1516.
ZUREK W., (1982) *Phys. Rev. D*26, 1862.
ZUREK W., (1991) *"Decoherence and the Transition from Quantum to Classical"*, *Physics Today*, october 1991, p36.
ZWIRN H.P., (1992) *"Du quantique au classique"*, Pour la Science, n°182, dec 1992.
ZWIRN H.P., (1994) *"La place de la conscience en physique"*, *Neuro-psy*, Vol 9, n°9, nov 1994.
ZWIRN H.P., (1997) *"La décohérence est-elle la solution du problème de la mesure ?"*, in d'Espagnat(1997).
ZWIRN H.P., (2000) *"Les limites de la connaissance"*, Odile Jacob (2000).