

## Chapitre 5. Une seule physique quantique... plusieurs interprétations...

*« – Inutile d'essayer, dit Alice, il est impossible de croire aux choses impossibles.*

*– À mon avis vous manquez de pratique, répliqua la Reine. Moi, à votre âge, je m'y appliquais une demi-heure tous les jours. Il m'est arrivé alors de croire jusqu'à six choses impossibles avant le petit déjeuner ».*

Lewis Carroll, *De l'autre côté du miroir*.

Dans ce chapitre nous décrivons les solutions qui ont été proposées afin de résoudre les paradoxes qui sont la conséquence des équations de la physique quantique. Nous rappellerons tout d'abord les grandes interprétations de la physique quantique devenues maintenant classiques et soutenues par les principales écoles de pensées. Puis nous décrivons des conceptions plus récentes en reprenant la question de ce que l'on appelle le problème de la mesure.

### *Les positivistes (Bohr, Heisenberg, Hawking)*

Selon les positivistes nous devons faire la distinction entre la réalité et *la connaissance que nous en avons*. Pour ces physiciens regroupés sous l'appellation d'École de Copenhague, l'équation de Schrödinger décrit ce que nous savons du système observé et non pas le système lui-même. Selon les positivistes, en effet, les lois de la physique quantique nous permettent de calculer la probabilité de survenue des événements mais pas d'appréhender la réalité en soi. Le but d'une théorie physique est de faire des prédictions et, si les mesures sont conformes aux prédictions,

que demander de plus à une théorie physique ? Ne pas s'en contenter c'est, toujours selon les positivistes, faire de la métaphysique. Il est donc vain de parler d'une « réduction de la fonction d'onde » au moment de la mesure ou de se demander si le chat est mort ou vivant.

En particulier s'interroger sur l'état de santé du chat de Schrödinger est pour ces physiciens totalement oiseux puisque la superposition qui fait discussion est décrite dans l'espace de Hilbert, un espace dont le nombre de dimension est infini et qui ne saurait être une « représentation » directe du monde que nous connaissons. L'utilité de cet espace et du formalisme associé est de permettre de calculer la *probabilité de survenue* des différents états possibles du système. Ce n'est pas pour autant une « représentation de la réalité ». De même la fameuse « réduction de la fonction d'onde » lors du « choix » du résultat de la mesure ne serait pas « réelle » mais traduirait simplement *l'évolution de la connaissance* que nous avons sur un système physique.

#### *L'influence de la conscience (Wigner, von Neuman)*

Pour Wigner et d'autres physiciens tels que von Neuman, il est nécessaire d'intégrer l'observateur dans la description du système mesuré. En effet, lorsque le physicien regarde si le chat est mort ou vivant (avec l'ampoule cassée ou intacte) il entre lui aussi dans un état de superposition : « physicien ayant vu le chat mort » *et* « physicien ayant vu le chat vivant ». C'est le processus de « conscience » qui serait responsable de la réduction de la fonction d'onde et obligerait le système à passer dans l'état A ou B (ampoule cassée avec chat mort ou ampoule intacte avec chat vivant). Pourquoi le choix A ou le choix B est sélectionné n'est cependant pas explicite. Cette conception suppose un dualisme corps-esprit qui n'est pas évident *a priori* car il fait intervenir une entité – la conscience – que d'une part on peine à définir scientifiquement et qui d'autre part ne ferait pas partie du monde matériel mais pourrait néanmoins avoir une action sur lui.

Poussant la logique jusqu'au bout on peut imaginer qu'aucun observateur ne prenne connaissance de l'état du chat à la fin de l'expérience. En revanche une photo serait prise automatiquement. Après plusieurs années, un observateur en prendrait connaissance. Si on suit la logique de Wigner, c'est à ce moment qu'aurait lieu la réduction de la fonction d'onde et que se déciderait l'état du chat.

*Théorie des mondes multiples (Everett)*

Contrairement aux positivistes, les tenants de l'hypothèse d'Everett soutiennent que *la fonction d'onde décrit vraiment la réalité*. Simplement – si on peut dire – les différentes réalités possibles coexisteraient mais dans des *univers parallèles* qui ne pourraient toutefois pas communiquer. Il serait d'ailleurs plus exact de parler de *mondes divergents*. Bien qu'elle soit pour le moins surprenante, cette interprétation a pour elle néanmoins le fait qu'elle évacue la question de la « réduction de la fonction d'onde ». Ainsi selon cette interprétation lorsqu'on mesure le spin d'un électron, l'univers se divise en deux : dans l'un des univers l'observateur mesure avec l'appareil un spin positif et dans l'autre univers un spin négatif. Il ne peut par conséquent y avoir superposition de deux états quantiques et par conséquent dans un univers le chat de Schrödinger est vivant et dans l'autre, il est mort.

Cette interprétation s'oppose donc à la vision positiviste qui comme nous l'avons vu considère que la fonction d'onde décrit la *connaissance* que nous avons de la réalité et non pas la réalité elle-même. Pour les tenants de la théorie des univers multiples la fonction d'onde décrit bien la réalité. Plus exactement, elle décrit *toutes les réalités* qui existent simultanément.

En dépit de son caractère «incroyable», cette interprétation de la physique quantique remporte l'adhésion d'une majorité de physiciens (du moins parmi ceux qui se préoccupent des conséquences de la physique quantique). Cette interprétation de la physique quantique par les mondes multiples continue d'être explorée et raffinée par de nombreux physiciens

tels que David Deutsch et Anton Zeilinger.<sup>1</sup> L'intérêt de cette interprétation est qu'elle respecte le formalisme quantique sans ajouter d'hypothèses supplémentaires et évite un certain nombre de paradoxes. Le prix à payer est toutefois la prolifération des univers. Il faut remarquer qu'adopter une autre conception qui fait l'économie des univers multiples n'est confortable qu'en apparence. En effet, nous avons vu avec le paradoxe EPR que deux particules qui ont interagi vont en quelque sorte s'interroger en permanence : lorsque l'une d'entre elles subit une mesure, l'autre en est « informée » de façon instantanée quelle que soit la distance. Or toute particule a subi depuis le big bang de multiples interactions. Il faut donc supposer, dès lors qu'une mesure est faite, que des échanges instantanés d'informations ont lieu entre les innombrables particules qui ont interagi dans le passé. Est-ce finalement plus confortable que postuler l'existence d'univers multiples ?

### *Le problème de la mesure*

Le « problème de la mesure » prend sa source dans les deux « outils » théoriques dont dispose la physique quantique pour décrire l'évolution d'un système. Le premier est l'équation de Schrödinger qui permet de prédire l'évolution d'un système *en dehors de toute mesure*. Cette équation est déterministe et elle décrit l'évolution *dans l'état de superposition* de l'ensemble « système observé-appareil de mesure ». Le deuxième outil est le « principe de réduction de la fonction d'onde » qui donne les règles pour prédire (avec une certaine probabilité) ce que l'on observera *si on mesure* un paramètre (un « observable ») de ce système.

Ces deux outils qui sont utilisés selon que l'on fait ou non une mesure supposent que l'on sache précisément ce qu'est une mesure. Or, selon certains physiciens, c'est loin d'être le cas. En effet, si on mesure un système S (une particule) à l'aide d'un appareil A, le principe de réduction de la fonction d'onde nous donne l'évolution de S après la mesure. Mais on peut aussi considérer le grand système constitué de S et de A. Ce

système n'étant soumis à aucune mesure, son évolution est décrite par l'équation de Schrödinger. Par conséquent dans un cas on a un système  $S$  où le paramètre mesuré possède une valeur bien définie et dans l'autre cas le système considéré reste dans un état superposé sans valeur définie pour le paramètre. C'est ce que l'on appelle en physique quantique le *problème de la mesure*.

Plusieurs solutions, ont été proposées par différentes écoles soit pour tenter d'apporter une réponse à cette question, soit pour la rendre sans objet. Pour les tenants de l'interprétation de Copenhague (Bohr, Heisenberg) il s'agit d'un faux problème car, selon ces derniers, nous n'avons pas à nous soucier de l'existence d'entités en dehors des mesures. Le but de la physique est de décrire la *connaissance* que nous avons sur les phénomènes et de donner des *règles opérationnelles* qui permettent de les décrire. Décrire la réalité *en soi* n'a tout simplement pas de sens ou du moins est en dehors des buts de la physique.

On peut penser, comme Wigner ou von Neuman, que c'est l'état de conscience lui-même qui est responsable de la réduction de la fonction d'onde. La nature de cette interaction entre la conscience et la réalité reste toutefois peu claire et insatisfaisante. En particulier, cette prise de position conduit à penser que les objets n'ont aucune valeur définie (par exemple pas de position définie) si personne de les observe.

Quant à la théorie des univers multiples, elle considère que la fonction d'onde n'est jamais réduite et reste dans l'état superposé. L'aspect classique du monde pour chaque observateur est expliqué par la scission de l'univers en plusieurs branches lors de la mesure.

#### *La « solution » de la décohérence*

Un début de réponse à ces différents paradoxes et difficultés conceptuelles est intervenu au cours des années 1970. Un physicien (Zeh) a fait remarquer que les différentes expériences de pensée proposées

jusque là faisaient implicitement référence à des systèmes isolés de leur environnement ce qui n'est jamais le cas en pratique. Par conséquent il faut, selon Zeh, faire entrer la description de l'environnement physique (atmosphère, radiations électromagnétiques, agitation thermique, etc.) dans l'équation de Schrödinger et considérer que le système constitué du système S, de l'appareil A et de l'environnement E sont enchevêtrés. Comme on ne fait pas de mesure sur ce grand système, seule l'équation de Schrödinger peut être utilisée pour étudier son évolution. Mais dans la réalité, ce qui nous intéresse c'est l'appareil A et le système S, nous ne soucions pas de leur environnement. De plus cet environnement est constitué d'un tel nombre d'éléments que nous serions incapables de les prendre en compte.

Complétant cette remarque, un autre physicien, Zurek, a montré qu'à partir des équations du « grand système » SAE, on pouvait en déduire l'évolution du système SA et que l'on « retombait » en pratique sur les prédictions du principe de réduction de la fonction d'onde. Les deux principes d'évolution (réduction de la fonction d'onde et équation de Schrödinger) qui s'appliquent à un système physique selon que l'on fait une mesure ou non sont donc apparemment réconciliés. Le *principe de réduction de la fonction d'onde* devient dans cette perspective un *raccourci de calcul de l'équation de Schrödinger* dont la portée est plus générale et c'est cette dernière qui décrit *toute la réalité*.

C'est donc une avancée considérable. Selon certains physiciens (Hawkins par exemple), le problème de la mesure serait ainsi résolu et les travaux qui ont suivi l'intuition initiale de Zeh mettraient ainsi un point final à la question. C'est l'environnement qui en *mesurant en permanence* du fait des interactions innombrables (ondes électromagnétiques, collisions liées à l'agitation thermique, etc.) serait responsable de l'aspect classique de la réalité. Le calcul montre que l'état superposé est d'autant plus bref que l'on s'adresse à des systèmes constitués d'un grand nombre d'atomes.

Le mécanisme responsable de la disparition de l'état superposé du fait de l'interaction de l'environnement est nommé « décohérence ».

*Les limites de la « solution » de la décohérence*

Mais certains physiciens émettent un certain nombre de réserves sur la théorie de la décohérence. Non pas tant sur son exactitude qui est largement reconnue mais sur l'idée que la solution de la décohérence marquerait la fin du problème de la mesure. En substance ces physiciens font remarquer que si les équations des deux principes d'évolution aboutissent à des résultats certes très voisins si l'on tient compte de l'environnement, ces derniers ne sont pas exactement équivalents. En particulier, notent certains auteurs, cette façon de procéder (c'est-à-dire déduire mathématiquement l'état du système SA à partir de celui du grand système SAE) donne une description *pour nous* de l'état de SA qui nous *apparaît* effectivement classique. Néanmoins si nous avions des sens beaucoup plus développés (ou si nous disposions d'appareils de mesure infiniment plus étendus et subtils), alors nous *prendrions la mesure* (dans tous les sens du terme) de l'aspect enchevêtré de l'ensemble du grand système SAE. Nous constaterions en effet que l'enchevêtrement de SA s'est *distillé dans l'environnement*. En fait, si les objets nous apparaissent tels qu'ils sont (c'est-à-dire selon les lois de la physique classiques) c'est parce que nous sommes de fait incapables de réaliser certaines mesures.

C'est en substance la position de B. d'Espagnat qui considère que la fonction d'onde globale de l'Univers reste enchevêtrée et qu'il n'y a par conséquent d'un point de vue externe jamais de réduction de la fonction d'onde. Selon ce physicien, le mécanisme de décohérence explique pourquoi nous ne percevons toutefois de cette réalité globale qu'une partie « classique ». Il considère que nous ne pouvons accéder à cette réalité mais que nous pouvons parfois entrevoir certains aspects de cette réalité enchevêtrée qu'il appelle le « réel voilé ».

Nous nous trouvons donc à nouveau face à un choix philosophique. D'un côté, nous pouvons considérer qu'il est vain de se poser des questions concernant des mesures que nous ne pouvons de tout façon pas réaliser et que par conséquent la décohérence clôt la question du problème de la mesure. Mais d'un autre côté, nous pouvons également considérer que la réalité est quantique et que la décohérence explique *pourquoi la réalité nous apparaît classique*. Dans les deux cas, comme le fait remarquer H. Zwiirn, la décohérence persiste à faire jouer un rôle à la conscience :

« 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.* »<sup>2</sup>

Et, toujours selon Zwiirn, dans le premier cas la conscience *définit ce qu'est la réalité* ; dans le deuxième cas la conscience *prescrit la forme que revêt pour nous une réalité* qui nous dépasse.

#### *Le solipsisme convivial de Zwiirn*

Proche des positions de B. d'Espagnat, H. Zwiirn a proposé une interprétation du problème de la mesure qui, comme l'interprétation d'Everett, permet d'écarter le problème de la réduction de la fonction d'onde. De plus, elle écarte la question qui se pose dans le cas d'une loi de probabilité continue avec pour conséquence un nombre d'univers issus de la scission qui serait infini.

Pour H. Zwiirn, la réalité reste entremêlée et il n'y a jamais réduction de la fonction d'onde. Toutefois, au contraire de l'interprétation d'Everett, l'univers reste unique bien qu'entremêlé. La fonction d'onde du système observé ainsi que celle des observateurs évolue selon

l'équation déterministe de Schrödinger. Comment expliquer alors que nous n'ayons jamais l'impression d'être superposé et de n'observer jamais qu'un des résultats possible ?

Tout d'abord H. Zwirn fait remarquer que :

« [...] l'impression qu'a l'observateur dépend directement de ce qui est accessible à sa conscience. Or, ce qui est accessible à sa conscience se réduit à ce qu'il est capable de percevoir donc de mesurer d'une manière ou d'une autre. L'observateur ne peut donc avoir conscience d'effets non mesurables, que ce soit en principe ou en pratique. »<sup>3</sup>

En d'autres termes nous percevons le monde tel que nos sens et notre cerveau nous y autorisent. Il reste à expliquer pourquoi nous voyons tel aspect de la réalité et pas tel autre lui aussi possible. Zwirn postule alors que cette sélection est effectuée par la conscience de chaque observateur qui s' « accroche » à un seul des différents états possibles.

La position de H. Zwirn est donc conforme à un point de vue « externe » : l'univers incluant les observateurs évolue selon l'équation de Schrödinger et la fonction d'onde n'est jamais réduite. Toutefois, la perception qu'a un observateur de la réalité dépend de différentes limitations liées à ses modes de perception qui l'empêchent d'avoir accès aux résultats de certaines mesures. Ne prenant pas conscience de la différence entre l'univers entremêlé « réel » et l'univers qu'il perçoit chaque observateur ne peut avoir qu'un point de vue « interne ».

Afin d'expliquer comment se fait le « mécanisme d'accrochage » de la conscience à la réalité perçue, H. Zwirn fait la distinction suivante. Etant donné que l'état de conscience de tout observateur n'est jamais superposé, il distingue cet *état de conscience* de l'*état cérébral* qui lui peut être dans un état superposé car lié au cerveau, objet matériel décrit par l'équation de Schrödinger. Dans quel « état de conscience » se trouve

l'observateur dont le cerveau est dans un état enchevêtré avec l'objet qu'il perçoit ? Le principe suivant est alors introduit :

« Lors de la perception d'un nouvel état enchevêtré, le nouvel état de conscience est obtenu en sélectionnant parmi les états composant l'état final enchevêtré celui auquel l'observateur était accroché précédemment. L'observateur est alors accroché à ce nouvel état de conscience pour toute mesure ultérieure. »

Il est important de comprendre que le « principe d'accrochage » ne concerne que *la perception du monde par l'observateur* et non pas l'état physique des systèmes observés.<sup>4</sup> Bien entendu la conscience n'est pas un objet physique et il ne saurait être question d'y voir le retour d'une conception prônant la dualité corps-esprit. Concernant la conscience, nous sommes ici dans le domaine du *sens* et de l'*interprétation*. Selon cette conception, il y a autant de différence entre le cerveau et la conscience qu'entre la réalité matérielle de cette feuille de papier faite de molécules de cellulose et d'encre dans une certaine configuration spatiale et le sens que le lecteur – nous l'espérons – peut y trouver. Nous pouvons alors admettre que la conscience n'est pas soumise aux lois de la physique. Ainsi, l'univers évolue selon l'équation de Schrödinger et la conscience l'interprète en fonction de ce qu'elle perçoit.<sup>5</sup>

*Notes de fin de chapitre*

---

<sup>1</sup> C. Bruce. Les lapins de M. Schrödinger ou comment se multiplient les univers quantiques. *Le Pommier* 2004.

<sup>2</sup> H. Zwirn. 2002. Mécanique quantique et connaissance du réel. Académie des Sciences morales et politiques (<http://www.asmp.fr/travaux/gpw/philosc/rapport2/5-Zwirn.pdf>). C'est moi qui souligne.

<sup>3</sup> H. Zwirn. Les limites de la connaissance. *Odile Jacob* 2000, p. 238.

<sup>4</sup> Il est particulièrement intéressant de rapprocher les principes de la physique quantique et les expériences du neurophysiologiste Benjamin Libet, ce qui, à ma connaissance, n'a jamais été fait. Selon ces expériences, reproduites par d'autres équipes, la *prise de conscience* d'une décision (un acte moteur, par exemple) a lieu après un délai non négligeable, d'une demi-seconde environ, après le déclenchement de l'acte « volontaire ». Le sujet n'a pas conscience de ce délai car la perception de la prise de décision est « antidatée » pour coïncider avec le début de l'acte. Ces expériences montrent donc que *l'état de conscience n'est pas assimilable à l'état neuronal* du sujet. Ces résultats continuent de faire l'objet de nombreuses discussions. En effet, on peut se demander ce qu'il en est de la liberté du sujet si la conscience ne fait qu'entériner un acte qui de toute façon est inéluctable (même si Libet a mis en évidence une courte période pendant laquelle un veto pourrait annuler l'acte volontaire). Dans un contexte quantique l'interprétation de ces expériences se voit totalement renouvelée. Notre conscience n'étant accrochée qu'à une branche d'univers (localité), nous avons effectivement l'illusion au travers des expériences de Libet d'un déterminisme implacable et d'une absence de liberté de choix. Dans l'univers quantique, la question du choix est alors déplacée : l'univers explore pour nous toutes les possibilités (équation de Schrödinger) et la perception de l'une des différentes branches possibles de l'univers se fait au hasard (après éventuellement un « filtre » des différentes branches possibles d'univers comme nous le verrons au Chapitre 10).

<sup>5</sup> En fait, cette interprétation n'est guère éloignée de celle des mondes multiples. En effet si la théorie des univers multiples reste si contraire au sens commun c'est probablement parce que nous avons avec l'espace un rapport particulier. On peut également à l'instar de nombreux philosophes et physiciens considérer que l'espace n'est qu'un mode particulier de notre perception de la réalité. On peut donc, au choix, considérer que l'espace n'ayant pas de réalité *en soi*, n'étant qu'une façon de se représenter le monde, nous n'avons pas à nous préoccuper s'il se divise « réellement » ou si ce n'est qu'une façon commode de décrire des événements et des phénomènes. Par conséquent dire qu'à l'issue de chaque mesure quantique le monde se divise en plusieurs univers ou que la conscience « s'accroche » à une partie de la fonction d'onde n'est peut-être pas si différent qu'il y paraît. A ce propos le traducteur du livre de C. Bruce (*Les lapins de M. Schrödinger, op. cit.*) fait la remarque suivante (note page 248) : « Rappelons encore une fois que "monde multiple" est une métaphore quelque peu trompeuse pour désigner ce qui est un monde unique dans lequel différentes versions de la réalité se superposent (et interfèrent éventuellement) ».