

# La physique quantique : un voyage au cœur de la réalité

**Daniel Fortier**

## Table des matières

	<b>Page</b>
<b>Introduction</b> _____	<b>2</b>
<b>Première partie. La science</b> _____	<b>5</b>
Chapitre 1    Réalité, théorie et données _____	5
Chapitre 2    L'état d'un objet _____	8
Chapitre 3    Le problème de la mesure en mécanique quantique _____	18
Chapitre 4    L'évolution de l'état d'un objet _____	23
Chapitre 5    Compléments à la théorie quantique _____	26
<b>Deuxième partie. La philosophie</b> _____	<b>34</b>
Chapitre 6    Introduction à la philosophie de la mécanique quantique _____	34
Chapitre 7    L'interprétation statistique (ou interprétation d'ensemble) _____	37
Chapitre 8    L'interprétation de Copenhague et l'interprétation existentielle _____	41
Chapitre 9    L'interprétation paradoxaliste _____	57
Chapitre 10    L'interprétation subjectiviste _____	59
Chapitre 11    Le chat de Schrödinger _____	65
Chapitre 12    L'interprétation de l'influence de la conscience _____	69
Chapitre 13    Le paradoxe EPR _____	75
Chapitre 14    Le théorème de Bell et les expériences d'Aspect _____	82
Chapitre 15    L'interprétation des univers parallèles _____	85
Chapitre 16    La position instrumentaliste _____	92
<b>Conclusion</b> _____	<b>93</b>
<b>Biographie</b> _____	<b>94</b>
<b>Références</b> _____	<b>95</b>

Copyright Daniel Fortier 2009. Tous droits réservés.

*Un voyage au coeur de la réalité – Daniel Fortier*

## Introduction

La mécanique quantique est la science la plus mystérieuse, la plus contre-intuitive. Elle traite d'abord et avant tout du niveau le plus fondamental de la réalité, celui des particules (électrons, atomes, photons...), que l'on peut désigner métaphoriquement comme l'échelle de l'infiniment petit. La mécanique quantique a fait entrer dans la physique des concepts radicalement nouveaux : dualité onde-corpuscule, superposition d'états, probabilités et hasard, effet de l'observateur, etc.

La mécanique quantique est une théorie scientifique. Son formalisme mathématique est globalement cohérent ; l'accord entre celui-ci et les résultats de mesures, d'observations et d'expériences est solidement établi. La théorie quantique est d'ailleurs, avec la théorie de la relativité restreinte, la théorie scientifique la plus solidement confirmée par les données, toutes disciplines confondues (physique, chimie, biologie, psychologie et sciences sociales). Tous les résultats de mesures, d'observations et d'expériences accumulés à ce jour confirment les prédictions tirées de la théorie quantique et, cela, avec un degré de précision inégalé en science. À ce jour, aucune prédiction tirée de la théorie quantique n'a été contredite. (Il en va de même avec la théorie de la relativité restreinte.)

Mais la signification du formalisme mathématique de la mécanique quantique, la conception de la réalité qu'il implique, demeure une énigme. Dans la communauté des physiciens, il y a consensus sur la science mais controverse sur son interprétation philosophique.

Certains physiciens, comme Einstein, pensent que la mécanique quantique n'est pas une théorie physique fondamentale, qu'elle donne de la réalité une description incomplète. Ce point de vue est incarné par l'interprétation statistique, aussi nommée interprétation d'ensemble. Adopter le point de vue contraire nous mène à des conceptions contre-intuitives de l'échelle quantique de la réalité, radicalement différentes de notre conception de l'échelle classique, celle que nous percevons directement par nos sens dans notre quotidien. L'échelle classique est unique ; l'échelle quantique serait multiple.

L'interprétation de Copenhague nous présente une échelle quantique intrinsèquement incertaine (indéfinie, floue), acausale et aléatoire, où ce sont les actes d'observation, effectués par l'entremise d'instruments dans des dispositifs expérimentaux, qui donnent réalité aux phénomènes et déterminent quelles sont les grandeurs dynamiques (position, vitesse, spin...) qu'ils acquièrent et sous quel aspect (onde ou corpuscule) ils se manifestent. Les grandeurs dynamiques sont définies au hasard : une seule possibilité quantique devient, au hasard, une réalité classique. Il existe des paires de propriétés complémentaires qui ne peuvent pas devenir réelles simultanément au cours d'un même acte d'observation : ce sont les grandeurs dynamiques position et vitesse et les aspects onde et corpuscule.

L'interprétation des univers parallèles nous présente une échelle quantique de la réalité parfaitement définie, causale et déterministe, indépendante d'être observée ou non, mais

constituant un Multivers où toutes les possibilités quantiques sont réelles et engendrent une multiplicité foisonnante de réalités classiques parallèles.

De telles interprétations philosophiques, fort éloignées du sens commun, sont bel et bien rationnelles car conformes à la mécanique quantique, à la science ! Mais l'interprétation philosophique de la mécanique quantique est aussi un sujet favori pour ceux qui professent des conceptions irrationnelles de la réalité, qu'ils soient gourous du Nouvel-Âge, philosophes ou même physiciens et journalistes scientifiques. La mécanique quantique est alors invoquée comme fondement, justification ou preuve scientifique de telles conceptions. Il existe trois interprétations irrationnelles principales, toutes des détournements de l'interprétation de Copenhague. Selon l'interprétation que nous qualifierons de paradoxaliste, un phénomène quantique serait la synthèse de propriétés contradictoires. Selon une première variante de l'interprétation subjectiviste, les phénomènes quantiques ne seraient, en dernière analyse, rien d'autre que la matérialisation des choix de l'expérimentateur, qui a conçu l'expérience, la met en marche et prend conscience des résultats indiqués par les instruments. Selon une deuxième variante de l'interprétation subjectiviste et selon l'interprétation de l'influence de la conscience, qui vont plus loin encore, la réalité matérielle, que ce soit uniquement à l'échelle quantique ou globalement, ne se suffirait pas à elle-même : ce serait uniquement les actes de perception effectués par des êtres dotés de conscience qui donneraient réalité aux phénomènes matériels et détermineraient les propriétés qu'ils acquièrent. Il existerait un lien profond et nécessaire entre la conscience et la réalité. Selon les deux variantes subjectivistes et l'interprétation de l'influence de la conscience, la mécanique quantique marquerait le retour de l'humain au centre de l'Univers, non pas au centre astronomique cette fois-ci, mais philosophique.

Pour comprendre le sujet fascinant et complexe qu'est la mécanique quantique, il est impératif de distinguer la science et la philosophie. Ce texte se divise en deux parties. La première constitue une présentation vulgarisée de la théorie quantique ; plusieurs questions fondamentales y seront posées mais demeureront sans réponse scientifique. La seconde partie est un exposé des principales interprétations philosophiques, les sensées (!) et les extravagantes, qui proposent différentes réponses philosophiques aux questions fondamentales laissées en suspens par la science, ainsi que des débats qui les opposent.

Ce texte ne requiert aucune connaissance préalable en physique, en mathématiques ni en philosophie. Il fait suite à une série de deux conférences que l'auteur a données devant les Sceptiques du Québec, le 13 février 2007 et le 13 septembre 2007.

Un compte-rendu de la conférence du 13 février 2007 est disponible à l'adresse suivante :

[http://www.sceptiques.qc.ca/assets/docs/Charest\\_Fortier.pdf](http://www.sceptiques.qc.ca/assets/docs/Charest_Fortier.pdf)

Vous trouverez un extrait vidéo de la première conférence à l'adresse suivante :

<http://www.youtube.com/watch?v=fowEH-EZFIU>

Vous trouverez, filmée en entier, la seconde conférence aux adresses suivantes :

<http://video.google.com/videoplay?docid=9154514598059225663>

(divisée en trois parties) ;

<http://www.youtube.com/profile?gl=IE&hl=en-GB&user=Sceptiques&view=videos>

(divisée en douze parties).

Merci à Louis Dubé pour avoir préparé un premier compte-rendu de la conférence du 13 septembre 2007 et pour avoir effectué une révision linguistique du présent texte.

# Première partie

## La science

### Chapitre 1

#### Réalité, théorie et données

Il est impératif de faire la distinction entre « ce que la réalité est et fait » et « ce que les humains connaissent de la réalité ». La science met en relation trois choses : (1) la réalité, (2) la théorie et (3) les données, soit les résultats de mesures, d'observations et d'expériences.

#### 1.1 La réalité

Les éléments de la réalité étudiés par la physique sont les objets, leurs propriétés et leur évolution dans le temps. À ce jour, la physique est divisée en deux grandes branches. D'une part, il y a la physique classique, qui traite des corps et des systèmes classiques. On peut définir les corps, de manière approximative, comme étant les objets macroscopiques, c'est-à-dire composés d'un très grand nombre de particules, tels les grains de poussière, les voitures, les oiseaux, les planètes, les amas de galaxies, etc. Un système classique est un ensemble de corps en interaction, par exemple le système solaire. D'autre part, il y a la physique quantique, qui traite des particules et des systèmes quantiques. Les particules sont des objets microscopiques, tels les électrons, les quarks, les protons, les neutrons, les noyaux atomiques, les atomes, les molécules, les photons (particules de lumière), etc. Un système quantique est un ensemble de particules en interaction (les atomes et les molécules sont aussi des systèmes quantiques), avec la participation possible de corps (par exemple un instrument de mesure).

Dans ce texte, nous considérons quatre catégories de propriétés. (1) Les grandeurs constantes, qui sont invariables en tout temps et en toutes circonstances. Dans le cas des particules quantiques, ce sont notamment leur masse et leur charge électrique. (2) Les grandeurs dynamiques externes, qui peuvent varier dans le temps et selon les circonstances et qui se rapportent à la situation d'un objet dans l'espace-temps. Il existe deux grandeurs dynamiques externes fondamentales, la position et la vitesse, qui, ensemble, spécifient la situation d'un objet dans l'espace-temps. L'immobilité est considérée en physique comme un type particulier de mouvement. (Notons qu'en réalité, les deux grandeurs dynamiques externes fondamentales sont la position et l'impulsion. À des fins de vulgarisation, nous remplaçons l'impulsion par la vitesse dans ce texte.) Toutes les autres grandeurs dynamiques externes, comme l'énergie et le moment cinétique (cette dernière grandeur dynamique est associée aux mouvements de rotation et de révolution), dépendent des deux grandeurs dynamiques externes fondamentales. (3) La grandeur dynamique interne de spin, exclusive aux particules quantiques, qui peut varier dans le temps et selon les circonstances et qui est une propriété interne aux particules, ne

se rapportant pas à leur situation dans l'espace-temps. (4) L'aspect sous lequel un objet se manifeste dans l'espace-temps, celui d'une onde ou d'un corps.

## 1.2 La théorie

Une théorie est un modèle, une représentation mentale, d'une partie de la réalité. Une théorie vise à décrire un ensemble de faits interdépendants, à les expliquer par des causes et à les prédire. Une théorie physique s'écrit en langage mathématique.

Les grandeurs constantes (comme la masse et la charge électrique) sont représentées de la même manière en physique classique et quantique : par des valeurs numériques uniques et invariables (par exemple : 4 kg pour la masse).

Par contre, les grandeurs dynamiques sont représentées de manières très différentes en physique classique et quantique. La physique classique les représente par des valeurs numériques uniques qui peuvent changer dans le temps et selon les circonstances. De son côté, la physique quantique représente chaque grandeur dynamique, interne comme externe, par deux ensembles de valeurs numériques interdépendants, un ensemble de « valeurs propres » (elles sont l'équivalent quantique de la valeur numérique unique classique) et un ensemble « d'amplitudes » (elles permettent de calculer des probabilités). À chaque valeur propre individuelle est associée une amplitude spécifique. Les ensembles de valeurs propres et d'amplitudes peuvent changer dans le temps et selon les circonstances. Ainsi, alors qu'en physique classique, une grandeur dynamique est représentée, à chaque instant qui passe, par une valeur numérique certaine, en physique quantique, une grandeur dynamique est en quelque sorte représentée, à chaque instant qui passe, par un ensemble de valeurs numériques possibles et par les probabilités de chacune d'être celle qui correspond à la réalité.

Si une voiture était un objet quantique, nous dirions que 10 secondes après son départ, sa position pourrait prendre n'importe quelle valeur entre 70 et 130 m à l'est du point de départ et sa vitesse n'importe quelle valeur entre 66 et 74 km/h vers l'est. Pour la position, la valeur 100 m pourrait avoir une probabilité de 60 % ; les valeurs 70 et 130 m de 0,1 % chacune ; les valeurs intermédiaires des probabilités intermédiaires. Dans le cas de la vitesse, la valeur 70 km/h pourrait avoir une probabilité de 40 % ; les valeurs 66 et 74 km/h de 10 % chacune ; les valeurs intermédiaires des probabilités intermédiaires.

En physique classique, les grandeurs dynamiques ne représentent pas les corps dans leur globalité, mais seulement des points matériels (des objets de grosseur nulle), leurs centres de masse. En physique quantique, par analogie avec la physique classique, les grandeurs dynamiques sont implicitement mises en correspondance avec des points matériels. Il peut s'agir des centres de masse des particules, si celles-ci sont conçues comme des objets étendus dans l'espace, ou des particules dans leur globalité, si elles sont considérées être réellement des objets ponctuels. La nature véritable des particules n'étant pas encore élucidée, on rencontre ces deux points de vue en physique quantique.

Toutes les particules, de matière et de lumière, obéissent au principe de la dualité onde-corpuscule : une même particule peut se manifester dans l'espace-temps tantôt sous l'aspect d'une onde et tantôt sous celui d'un corpuscule, selon les conditions environnementales. Alors qu'il est fréquent d'employer les termes « particule » et « corpuscule » comme synonymes, dans ce texte, à des fins de clarté, nous emploierons le terme « particule » uniquement pour désigner les plus petits objets de la réalité et le terme « corpuscule » uniquement pour désigner l'aspect de « petit corps », de « petite bille solide », sous lequel une particule peut se manifester dans l'espace-temps.

### **1.3 Les données**

Les mesures, observations et expériences sont au cœur de la démarche scientifique : elles constituent, pour les humains, la source de données sur le réel. Ces données sont obtenues par l'entremise de dispositifs expérimentaux et d'instruments porteurs de marges d'incertitude (ou marges d'erreur) ; plus l'équipement employé est précis et plus les marges d'incertitude sont petites.

Par exemple, en mécanique quantique, un instrument conçu pour mesurer la position d'une particule peut être un écran sur lequel on projette celle-ci ; l'écran est conçu pour qu'une tache apparaisse sur le lieu de l'impact. Le lieu d'apparition de la tache donne ainsi la position de la particule au moment de son interaction avec l'écran. La grosseur de la tache correspond à la marge d'incertitude de l'instrument : le point exact de l'impact peut se situer n'importe où à l'intérieur de la tache. Plus l'instrument est précis, plus la tache d'impact est petite et plus la connaissance de la position de la particule au moment de l'impact est précise.

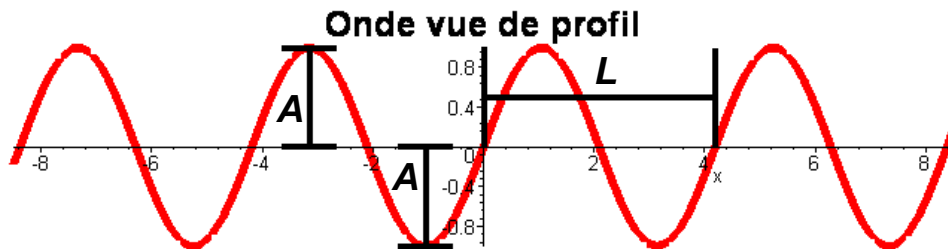
On peut aussi employer un instrument muni d'une aiguille mobile sur un cadran, par exemple pour mesurer la vitesse d'une particule. Un tel instrument est conçu pour que son interaction avec une particule produise un changement de l'orientation de l'aiguille sur le cadran. L'orientation finale de l'aiguille sur le cadran (la valeur numérique finale qu'elle indique) donne ici la vitesse de la particule au moment de son interaction avec l'instrument. Dans ce cas, la marge d'incertitude de l'instrument est spécifiée par son fabricant et indique avec quelle précision l'orientation finale de l'aiguille sur le cadran représente la vitesse de la particule au moment de la mesure.

## Chapitre 2 L'état d'un objet

### 2.1 Ondes de de Broglie et paquets d'ondes

#### (A) Les ondes de de Broglie

En 1924, Louis de Broglie fait l'hypothèse d'associer à chaque particule de matière une onde devant représenter son mouvement : la direction de propagation de l'onde correspond à la direction du mouvement de la particule et la longueur d'onde à l'inverse de la vitesse de la particule. Dans ce texte, nous désignerons une telle onde par l'expression « onde de de Broglie ».



Une onde simple, comme celle qui est illustrée ici, est un cycle constitué d'une crête et d'un creux qui se répète à l'infini, toujours pareil à lui-même. Une onde possède deux caractéristiques principales : sa longueur d'onde  $L$ , dans la direction horizontale, qui donne la longueur d'un cycle, soit la longueur d'une crête et d'un creux, et son amplitude  $A$ , dans la direction verticale, qui donne la hauteur des crêtes et la profondeur des creux, identiques. Notons que l'amplitude ne désigne pas la hauteur ou la profondeur effectivement atteinte à un instant donné par une partie de l'onde en train d'osciller, mais la hauteur maximale et la profondeur maximale que cette partie atteint. Dans le cas d'une onde simple, l'amplitude est uniforme : elle est la même partout. La longueur d'onde et l'amplitude sont deux paramètres indépendants l'un de l'autre : pour une longueur d'onde donnée, une onde peut avoir n'importe quelle amplitude, et réciproquement.

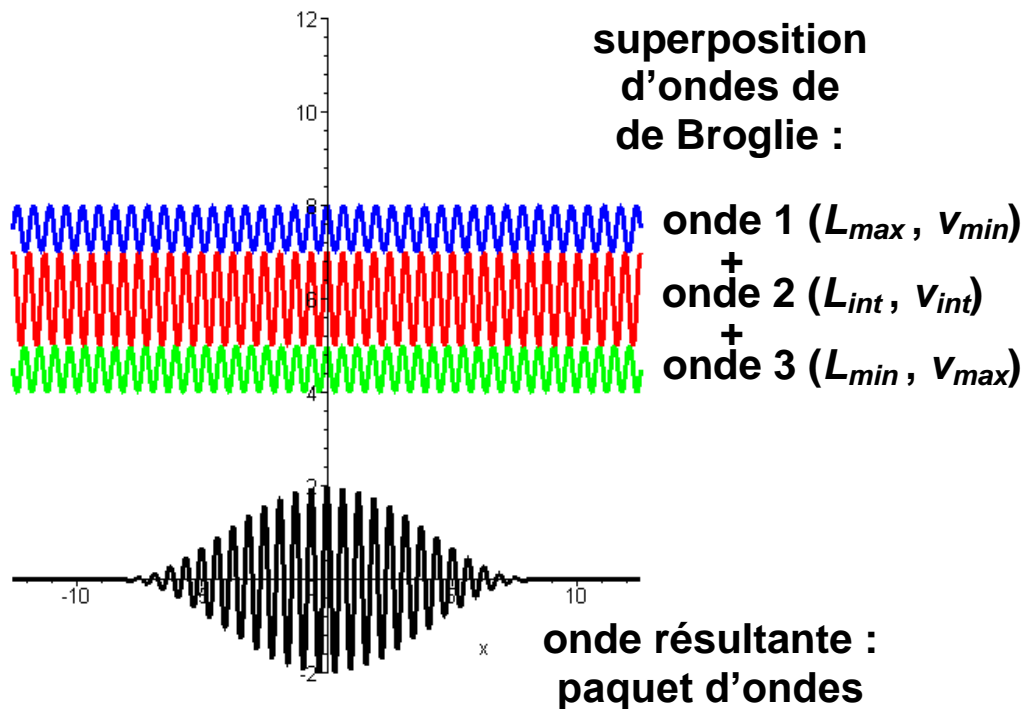
Une équation nommée la « relation de de Broglie » énonce que la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse de la particule matérielle à laquelle l'onde est associée. L'immobilité d'une particule, soit une vitesse nulle, est représentée par une longueur d'onde infinie. La vitesse limite pour une particule matérielle, soit la vitesse de la lumière dans le vide (300 000 km/s ou 1 milliard km/h), est représentée par une longueur d'onde nulle.

## (B) Spectre de de Broglie et paquet d'ondes

L'hypothèse de de Broglie pose un problème. Si une particule est représentée par une onde simple, sa position devrait être celle de cette onde simple. Or, une onde simple s'étend sur une longueur infinie ! Est-ce à dire qu'une particule remplit tout l'Univers ? Bien entendu, un tel modèle ne serait pas désirable. Heureusement, il est possible, grâce, non pas à une, mais à *plusieurs* ondes simples, de construire un objet mathématique localisé dans l'espace. Un tel objet mathématique sera adéquat pour représenter la situation d'une particule dans l'espace-temps, soit à la fois sa position (représentée par la position de l'objet mathématique) et sa vitesse (représentée par l'inverse de la longueur d'onde de l'objet mathématique).

Si l'on superpose (additionne) plusieurs ondes simples de différentes longueurs d'ondes et amplitudes, on obtient une onde résultante unique dont l'amplitude est nulle partout sauf en une région localisée, que l'on nomme « paquet d'ondes ». Nous avons construit un paquet en superposant des ondes.

### Ondes de de Broglie et paquet d'ondes



Sur cette figure, nous avons additionné trois ondes de de Broglie : l'onde 1 a la plus grande longueur d'onde ( $L_{max}$ ) et correspond à la plus petite vitesse ( $v_{min}$ ) ; l'onde 2 a une longueur d'onde intermédiaire ( $L_{int}$ ) et correspond à une vitesse intermédiaire ( $v_{int}$ ) ; l'onde 3 a la plus courte longueur d'onde ( $L_{min}$ ) et correspond à la plus grande vitesse ( $v_{max}$ ). Notons que, sur cette figure, les différences entre les trois longueurs d'onde sont

petites. Notons aussi que l'onde 2 a une amplitude deux fois plus grande que les amplitudes des ondes 1 et 3, qui sont égales. Sur la figure, nous avons disposé ces trois ondes de de Broglie les unes au-dessus des autres afin de bien les distinguer. En réalité, elles se superposent (s'additionnent) : elles se chevauchent, perdent leur individualité et fusionnent en une onde résultante unique.

Lorsque des ondes se superposent, deux phénomènes se produisent. D'une part, lorsqu'une crête d'une onde et un creux d'une autre onde se rencontrent, ils tendent à s'annuler : ce phénomène se nomme interférence destructive. D'autre part, lorsque deux crêtes ou deux creux de deux ondes différentes se rencontrent, ils se renforcent : ce phénomène se nomme interférence constructive. Dans l'onde résultante unique illustrée ici, il y a interférence destructive partout sauf en une région localisée où il y a interférence constructive et que l'on nomme paquet d'ondes.

Avec le concept de paquet d'ondes, la physique quantique peut représenter les particules matérielles par un objet mathématique qui, à la fois, possède des propriétés ondulatoires et occupe une région délimitée de l'espace. Dans ce texte, nous nommerons « spectre de de Broglie » l'ensemble des ondes de de Broglie que l'on associe simultanément à une même particule matérielle afin de construire le paquet d'ondes. Cinq remarques importantes s'imposent ici.

**Première remarque.** Notre figure illustre une situation simplifiée, à une seule dimension d'espace. Seul l'axe horizontal de la figure représente une dimension de l'espace, la direction avant-arrière du mouvement de la particule. L'axe vertical de la figure ne représente pas la direction « haut-bas » ou « droite-gauche » de l'espace, mais sert seulement à illustrer les amplitudes des ondes. Le mouvement réel de la particule est représenté par le mouvement du paquet d'ondes le long de son axe horizontal, soit vers l'avant, soit vers l'arrière, ainsi que par les déformations et changements de grosseur qu'il peut subir en se déplaçant. Bien entendu, la description théorique véritable d'une particule doit se faire dans les trois dimensions de l'espace. On obtient une telle description en combinant mathématiquement trois descriptions à une dimension.

**Deuxième remarque.** Le paquet d'ondes est l'objet théorique qui incarne l'ensemble des valeurs propres et d'amplitudes attribuées à la grandeur dynamique position. Dans notre exemple simplifié, à une dimension d'espace, l'ensemble des valeurs propres de position est représenté par l'ensemble des points d'espace que couvre le paquet d'ondes et qui sont disposés le long de l'axe horizontal de la figure. Les amplitudes, associées aux différentes valeurs propres de position et qui permettent de calculer des probabilités, correspondent littéralement aux amplitudes distribuées dans le paquet d'ondes et qui sont illustrées selon l'axe vertical de la figure. L'amplitude correspond toujours à la hauteur maximale et à la profondeur maximale que peut atteindre une partie d'une onde en train d'osciller et non à la hauteur ou à la profondeur effectivement atteinte à un instant donné.

Le spectre de de Broglie est l'objet théorique qui incarne l'ensemble des valeurs propres et d'amplitudes attribuées à la grandeur dynamique vitesse. Dans notre exemple simplifié, l'ensemble des valeurs propres de vitesse (ici au nombre de trois) est représenté par

l'ensemble des longueurs d'onde présentes dans le spectre de de Broglie (en vertu de la relation de de Broglie), qui sont illustrées selon l'axe horizontal de la figure. Le signe, positif ou négatif, d'une valeur propre de vitesse donne la direction de propagation, vers l'avant ou vers l'arrière, de l'onde de de Broglie correspondante. Les amplitudes, associées aux différentes valeurs propres de vitesse, correspondent littéralement aux amplitudes des différentes ondes de de Broglie, qui sont illustrées selon l'axe vertical de la figure.

**Troisième remarque.** Dans la théorie quantique, nous n'additionnons pas, en réalité, un nombre limité d'ondes de de Broglie pour construire le paquet d'ondes, comme nous venons de le faire ici, mais un nombre infini. Un véritable spectre de de Broglie contient toutes les ondes de de Broglie possibles, ayant toutes les longueurs d'onde possibles, de nulle à infinie (représentant toutes les vitesses possibles, de l'immobilité jusqu'à la vitesse de la lumière dans le vide), et se propageant dans toutes les directions possibles de l'espace (dans une situation à une dimension : vers l'avant et vers l'arrière). Les amplitudes varient d'une onde de de Broglie à l'autre. Le paquet d'ondes alors obtenu n'a pas une grosseur bien déterminée, comme dans notre exemple simplifié, mais est lui-même infini : il couvre tous les points d'espace de l'Univers ! Les amplitudes varient d'un point d'espace à l'autre. (L'onde résultante obtenue par l'addition des trois ondes de de Broglie de notre exemple simplifié ne contient pas, en toute rigueur, un paquet d'ondes unique dont la grosseur est bien déterminée, comme nous l'avons illustré ci-haut, mais une répétition cyclique infinie de ce paquet d'ondes.)

**Quatrième remarque.** Dans un vrai spectre de de Broglie (infini), la quasi-totalité des ondes ont des amplitudes extrêmement petites, négligeables. Seul un certain continuum d'ondes ont des amplitudes significatives. Nommons ce continuum « partie effective du spectre de de Broglie » : c'est cette partie effective que les trois ondes de notre exemple simplifié symbolisent. De même, dans le cas d'un vrai paquet d'ondes (infini), les amplitudes sont négligeables presque partout, sauf à l'intérieur d'une certaine région que nous nommerons le « volume effectif du paquet d'ondes ». C'est ce volume effectif que le paquet d'ondes de notre exemple simplifié symbolise.

**Cinquième remarque.** En mécanique quantique, pour toute grandeur dynamique, la probabilité attribuée à une valeur propre individuelle se calcule en prenant le carré de l'amplitude qui lui est associée. Dans notre spectre de de Broglie simplifié, représentant la grandeur dynamique vitesse, les ondes 1 et 3 ont la même amplitude : les valeurs propres  $v_{min}$  et  $v_{max}$  ont la même probabilité. L'onde 2 a une amplitude deux fois plus grande : la valeur propre  $v_{int}$  a une probabilité quatre fois plus grande. La même règle de calcul s'applique à la grandeur dynamique position : la probabilité attribuée à une valeur propre individuelle de position se calcule en prenant le carré de l'amplitude qui lui est associée dans le paquet d'ondes.

Si la voiture donnée en exemple au chapitre 1, dont le mouvement s'effectue selon une seule dimension de l'espace, la direction avant-arrière, était un objet quantique, les trois ondes de notre spectre de de Broglie simplifié représenteraient respectivement les valeurs propres de vitesse de 66 km/h vers l'est (onde 1 ;

probabilité de 10 %), 70 km/h vers l'est (onde 2 ; probabilité de 40 %) et 74 km/h vers l'est (onde 3 ; probabilité de 10 %). Les ondes de de Broglie intermédiaires, non illustrées dans notre figure, représenteraient les valeurs propres de vitesse intermédiaires et compteraient pour la balance des probabilités, dont le total est toujours égal à 100 %.

Notre paquet d'ondes simplifié s'étendrait alors de la position 70 m (probabilité de 0,1 %) jusqu'à la position 130 m (probabilité de 0,1 %) à l'est du point de départ, avec une position centrale de 100 m (probabilité de 60 %). Les positions intermédiaires compteraient pour la balance des probabilités. (Le lecteur ne doit pas tenir compte des valeurs numériques indiquées sur la figure car elles ne se rapportent pas à l'exemple de la voiture.)

### (C) La transformation de Fourier

Le paquet d'ondes est l'onde unique qui résulte de la superposition de l'ensemble des ondes du spectre de de Broglie. Le spectre de de Broglie implique le paquet d'ondes qu'il engendre ; à l'inverse, le paquet d'ondes implique le spectre de de Broglie qui l'a engendré. En mécanique quantique, les ensembles de valeurs propres et d'amplitudes des deux grandeurs dynamiques fondamentales, la position et la vitesse, sont interdépendants, couplés. Ainsi, pour décrire la situation d'une particule dans l'espace-temps, spécifiée par les deux grandeurs dynamiques fondamentales, la théorie quantique a recours seulement au paquet d'ondes ou au spectre de de Broglie, pas aux deux simultanément.

L'équation qui sert à calculer les amplitudes associées aux valeurs propres de position se nomme la « fonction d'onde ». Dans ce texte, nous nommerons « fonction de vitesse » et « fonction de spin » les équations qui donnent les amplitudes associées aux valeurs propres, respectivement, de vitesse et de spin. La fonction d'onde est l'équation qui décrit, en langage mathématique, l'objet qu'est le paquet d'ondes et la fonction de vitesse l'équation qui décrit l'objet qu'est le spectre de de Broglie.

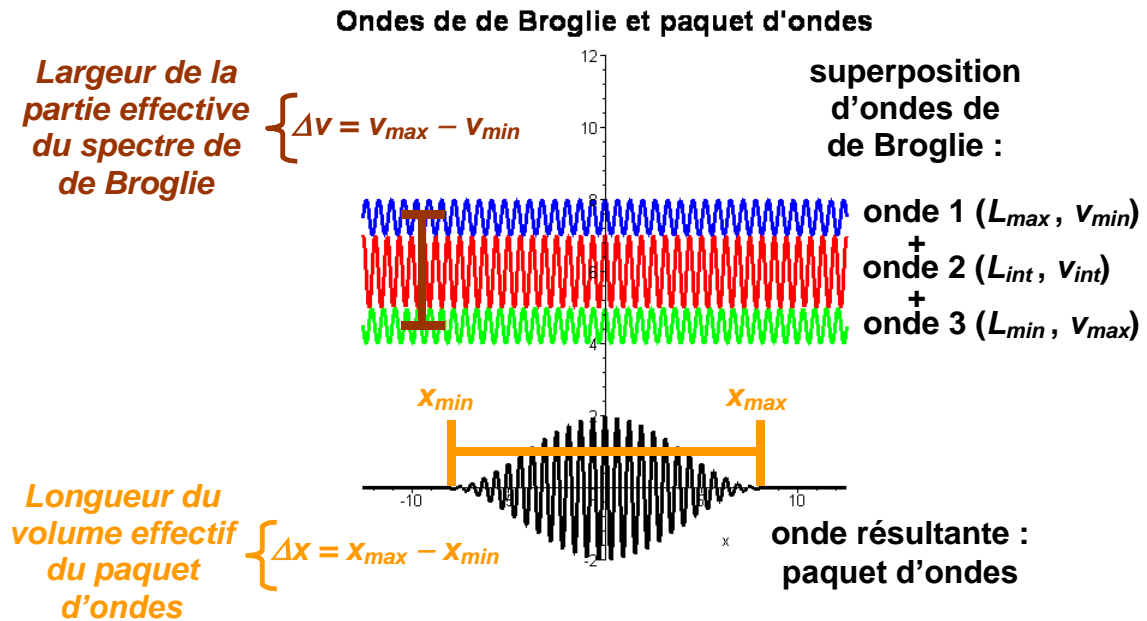
La fonction d'onde et la fonction de vitesse sont chacune porteuse de la même information, au sujet à la fois de la position et de la vitesse de la particule, décrite de deux manières différentes. La connaissance de l'une de ces deux fonctions implique automatiquement la connaissance de l'autre. Ces deux fonctions se calculent l'une à partir de l'autre par une opération mathématique nommée la transformation de Fourier.

### (D) La relation de Heisenberg

La transformation de Fourier possède une certaine propriété mathématique : lorsque deux fonctions sont reliées l'une à l'autre par cette opération, les largeurs des objets mathématiques qu'elles décrivent sont interdépendantes. En mécanique quantique, les largeurs effectives du paquet d'ondes et du spectre de de Broglie sont ainsi couplées : cette propriété de la transformation de Fourier se nomme alors la relation de Heisenberg.

Dans notre exemple simplifié, à une dimension d'espace, la longueur effective du paquet d'ondes est  $\Delta x = x_{max} - x_{min}$  (le symbole  $\Delta$  est la lettre grecque delta majuscule), où  $x_{max}$  est la valeur propre de position correspondant au point d'espace situé à l'avant du volume effectif du paquet d'ondes et  $x_{min}$  au point d'espace situé à l'arrière. La largeur effective du spectre de de Broglie est  $\Delta v = v_{max} - v_{min}$ .

Si nous reprenons l'exemple de la voiture traitée comme un objet quantique, nous obtenons  $\Delta x = 130 - 70 = 60$  m et  $\Delta v = 74 - 66 = 8$  km/h.

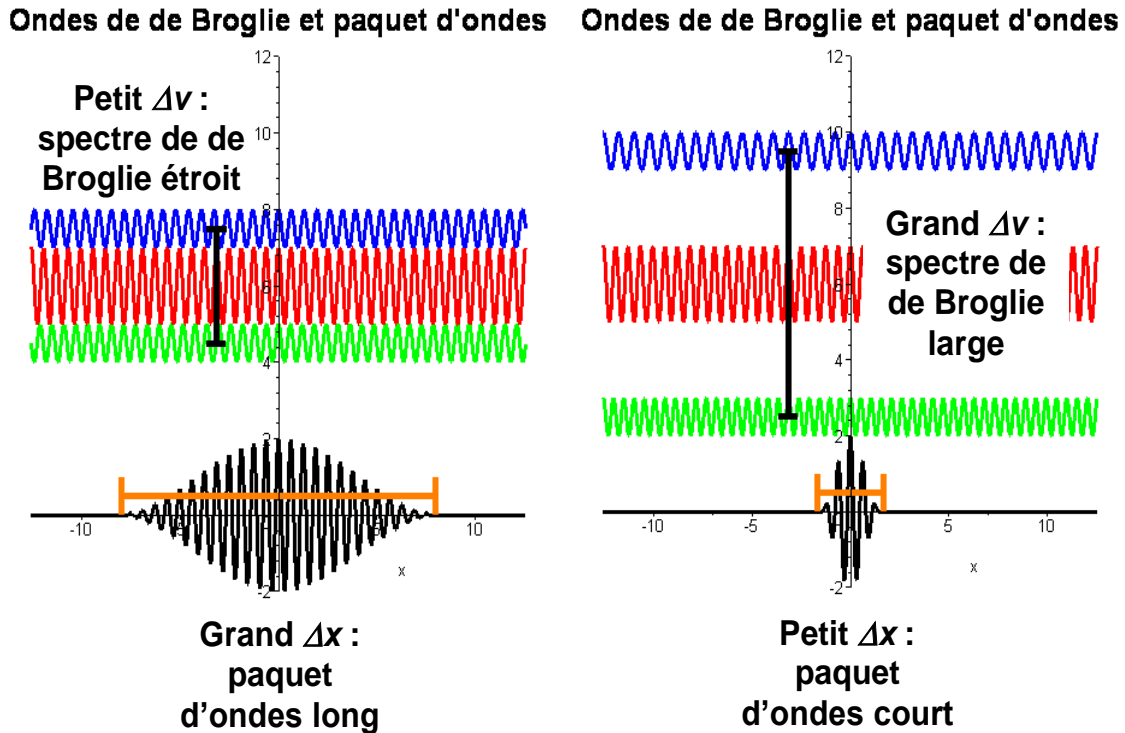


Pour une dimension donnée de l'espace (comme la direction avant-arrière du mouvement d'une particule), la relation de Heisenberg énonce que le produit des largeurs effectives du paquet d'ondes et du spectre de de Broglie doit en tout temps être égal ou supérieur à une valeur minimale :

$$\Delta x \Delta v \geq \text{valeur minimale}$$

La relation de Heisenberg signifie que les largeurs effectives du paquet d'ondes ( $\Delta x$ ) et du spectre de de Broglie ( $\Delta v$ ) peuvent être simultanément arbitrairement grandes mais non simultanément arbitrairement petites. Lorsque la valeur minimale fixée par la relation de Heisenberg est atteinte, faire diminuer l'une de ces deux largeurs effectives implique automatiquement l'augmentation de l'autre. Dans ce cas, plus la partie effective du spectre de de Broglie est étroite et plus la partie effective du paquet d'ondes est longue (comme dans la figure de gauche suivante) ; à l'inverse, plus la partie effective du paquet d'ondes est courte et plus la partie effective du spectre de de Broglie est large (comme dans la figure de droite suivante : l'onde 1 y est plus longue et l'onde 3 plus courte que dans la figure de gauche ; nous avons augmenté la distance verticale entre les ondes afin

d'illustrer symboliquement l'augmentation de la largeur effective du spectre de de Broglie).



## 2.2 La description théorique de l'état d'un corps

Le terme « état » désigne la situation d'un objet dans la réalité. L'état d'un corps correspond à sa situation dans l'espace-temps et est spécifié par les deux grandeurs dynamiques externes fondamentales, la position et la vitesse. Rappelons qu'en physique classique, les grandeurs dynamiques ne représentent pas un corps dans sa globalité, mais seulement un point matériel (un objet de grosseur nulle), son centre de masse.

Dans une situation simplifiée à une dimension, où un objet se déplace uniquement selon la direction avant-arrière, la description théorique de l'état d'un corps, pour chaque instant qui passe, consiste en la combinaison de deux valeurs numériques, celles attribuées à sa position et à sa vitesse à cet instant (la valeur numérique de vitesse porte un signe, positif ou négatif, qui indique la direction du mouvement).

## 2.3 La description théorique de l'état d'une particule

L'état d'une particule est la combinaison de sa situation dans l'espace-temps et de sa propriété interne de spin. Il est spécifié par trois grandeurs dynamiques, la position, la vitesse et le spin. Rappelons qu'en physique quantique, par analogie avec la physique

classique, les grandeurs dynamiques sont implicitement mises en correspondance avec un point matériel.

Dans une situation simplifiée à une dimension, où un objet se déplace uniquement selon la direction avant-arrière, la description théorique de l'état d'une particule, pour chaque instant qui passe, consiste en la combinaison de deux choses : (1) du paquet d'ondes (de l'ensemble continu et infini des valeurs propres de position et de leurs amplitudes) ou, de manière équivalente, du spectre de de Broglie (de l'ensemble continu et infini des valeurs propres de vitesse et de leurs amplitudes ; chaque valeur propre de vitesse porte un signe, positif ou négatif, qui indique la direction du mouvement), pour la situation de la particule dans l'espace-temps à cet instant ; (2) de l'ensemble discontinu et fini des valeurs propres de spin et de leurs amplitudes à cet instant.

Les deux grandeurs dynamiques fondamentales sont dites « continues » : la théorie leur octroie des continuums de valeurs propres. La grandeur dynamique de spin est dite « discrète » : la théorie lui octroie un ensemble de seulement quelques valeurs propres discontinues. Dans le cas d'un électron, d'un proton et d'un neutron, il n'existe que deux valeurs propres de spin,  $h/4\pi$  et  $-h/4\pi$ , où  $h$  est la constante de Planck, une constante physique fondamentale en mécanique quantique, et  $\pi = 3,1416\dots$

Revenons à l'exemple de la voiture du chapitre 1. Si on la traite comme un objet quantique, son état, à l'instant 10 secondes après son départ, est spécifié par la combinaison : (1) soit de toutes les positions possibles entre 70 et 130 m à l'est du point de départ, avec leurs amplitudes, ou, de manière équivalente, de toutes les vitesses possibles entre 66 et 74 km/h vers l'est, avec leurs amplitudes (l'information sur la position contenant implicitement l'information sur la vitesse et réciproquement) ; (2) des spins  $h/4\pi$  et  $-h/4\pi$  et de leurs amplitudes (nous avons ici attribué à notre voiture quantique les mêmes valeurs propres de spins qu'à un électron, un proton et un neutron ; en réalité, un corps ne possède pas de propriété interne de spin).

Pour le dire autrement, la description théorique de l'état d'une particule, pour chaque instant qui passe, consiste en la combinaison de deux choses : (1) de la fonction d'onde ou, de manière équivalente, de la fonction de vitesse, pour sa situation dans l'espace-temps à cet instant ; (2) de la fonction de spin à cet instant.

Il existe une approche mathématique alternative équivalente pour décrire l'état d'une particule : à la place des fonctions d'onde, de vitesse et de spin de Schrödinger, on peut recourir aux « vecteurs d'état » de Dirac.

## 2.4 Superposition d'états ou état superposé

L'état d'un corps est en tout temps unique : à chaque instant qui passe, son centre de masse se situe en un point unique de l'espace et suit un mouvement unique, en vitesse et en direction.

Par contre, l'état d'une particule, d'après sa description quantique, serait en tout temps multiple. À chaque instant qui passe, une particule, assimilée à un objet ponctuel, occuperait simultanément une multiplicité continue de points d'espace, suivrait simultanément une multiplicité continue de mouvements, c'est-à-dire qu'elle se déplacerait simultanément selon une multiplicité continue de vitesses et dans une multiplicité continue de directions, et posséderait simultanément une multiplicité discontinue de spins. L'état d'une particule est qualifié de « superposition d'états » ou « d'état superposé ».

Les états uniques des corps sont qualifiés « d'états classiques » et les états multiples (superposés) des particules « d'états quantiques ».

## 2.5 États propres des grandeurs dynamiques

Il existe certaines situations dans lesquelles la théorie quantique peut, à l'instar de la théorie classique, conférer une valeur numérique unique à une grandeur dynamique, par exemple immédiatement après sa mesure. Dans ce cas, toutes les amplitudes de la grandeur dynamique concernée tombent à zéro, sauf une seule (qui donnera une probabilité de 100 %). La valeur numérique unique attribuée à la grandeur dynamique est la valeur propre associée à cette amplitude non nulle. L'état superposé de la particule (assimilée à un objet ponctuel) est alors qualifié d'état propre de la grandeur dynamique en question (il correspond à une valeur propre unique de celle-ci) : il est unique selon cette grandeur dynamique mais demeure multiple selon les autres grandeurs dynamiques (qui sont toujours représentées par des ensembles de valeurs propres et d'amplitudes).

Un état propre de position consiste en un point d'espace unique qu'occupe la particule (assimilée à un objet ponctuel), accompagné d'une multiplicité continue de vitesses et d'une multiplicité discontinue de spins. Un état propre de vitesse consiste en un mouvement unique (en vitesse et en direction) que suit la particule, accompagné d'une multiplicité continue de positions et d'une multiplicité discontinue de spins. Un état propre de spin consiste en un spin unique que possède la particule, accompagné d'une multiplicité continue de positions et d'une multiplicité continue de vitesses.

Il existe des situations dans lesquelles la théorie quantique peut attribuer des valeurs numériques uniques à plusieurs grandeurs dynamiques simultanément, par exemple immédiatement après la mesure simultanée de celles-ci. L'état superposé de la particule (assimilée à un objet ponctuel) est alors qualifié d'état propre commun à ces grandeurs dynamiques : il est unique selon celles-ci mais demeure multiple selon les autres grandeurs dynamiques.

Ici se présente une caractéristique bien particulière de la mécanique quantique : en vertu de la relation de Heisenberg, la théorie quantique interdit l'existence d'états propres communs aux deux grandeurs dynamiques fondamentales, la position et la vitesse, qui ensemble spécifient la situation d'une particule dans l'espace-temps. En effet, selon la relation de Heisenberg, le produit  $\Delta x \Delta v$  doit être en tout temps égal ou supérieur à une valeur minimale. La relation de Heisenberg interdit que des valeurs numériques uniques

soient octroyées simultanément aux deux grandeurs dynamiques fondamentales (si tel était le cas, on aurait  $\Delta x = 0$  et  $\Delta v = 0$ ). Ainsi, selon la théorie quantique, une particule (assimilée à un objet ponctuel) ne peut pas, simultanément, occuper un point d'espace unique et suivre un mouvement unique (en vitesse et en direction).

Par extension, la théorie quantique interdit l'existence d'états propres communs à la position, à la vitesse et au spin. L'état d'une particule demeure intrinsèquement multiple en tout temps selon au moins l'une des trois grandeurs dynamiques qui le spécifient (plus précisément, selon au moins la position ou la vitesse).

Un état propre est considéré comme un état classique selon la ou les grandeurs dynamiques concernées.

### Chapitre 3

## Le problème de la mesure en mécanique quantique

En physique classique, chaque grandeur dynamique se fait octroyer une valeur numérique unique pour chaque instant qui passe. La mesure d'une grandeur dynamique à un instant donné donne toujours, avec certitude, la valeur numérique unique prédite par la théorie pour cet instant, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. Si l'on réinitialise une expérience et répète la même mesure dans les mêmes conditions, on obtient à chaque fois le même résultat, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. La théorie classique fait des prédictions de nature déterministe.

En physique quantique, la situation est radicalement différente. D'une part, la théorie attribue habituellement à chaque grandeur dynamique un ensemble de valeurs propres et d'amplitudes pour chaque instant qui passe. D'autre part, la mesure d'une grandeur dynamique à un instant donné donne toujours une valeur numérique unique et celle-ci est toujours égale à l'une des valeurs propres prédites par la théorie pour cet instant, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. Mais, si l'on réinitialise une expérience et répète la même mesure dans les mêmes conditions, on obtient à chaque fois un résultat différent, au hasard ! La théorie quantique fera des prédictions de nature aléatoire.

En mécanique quantique, nous faisons ainsi face au « problème de la mesure » : comment expliquer que, d'une part, la théorie quantique attribue à une particule non observée un état multiple (superposé) mais que, d'autre part, toute observation montre une particule dans un état unique (plus précisément, dans un état propre commun aux grandeurs dynamiques mesurées), obtenu au hasard et à l'intérieur des marges d'incertitude des instruments ? Pour le dire autrement : comment un état quantique (multiple) est-il transformé, au hasard par l'acte d'observation, en un état classique (unique) selon les grandeurs dynamiques mesurées ? Comment un résultat unique émerge-t-il au hasard d'une multiplicité de possibilités, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument ?

En 2009, la théorie quantique compte trois éléments de solution au problème de la mesure : (1) la règle de probabilités (1926), (2) le postulat de réduction (1932) et (3) la théorie de la décohérence (formulée initialement en 1952 ; en développement depuis 1981 et toujours objet de recherche). Les deux premiers éléments de solution se limitent à décrire l'effet de l'acte d'observation sur l'état d'une particule, sans l'expliquer. La théorie de la décohérence, dans son état actuel, apporte une explication partielle. Nous présentons dans ce chapitre les deux premiers éléments de solution ; la théorie de la décohérence sera présentée à la section 5.3.

### 3.1 Premier élément de solution : la règle de probabilité

En 1926, Max Born découvre que, dans une série d'un très grand nombre de mesures identiques, les proportions dans lesquelles les différentes valeurs propres prédites par la théorie sont obtenues comme résultat de mesure, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument, sont égales au carré des amplitudes associées. Les valeurs propres dont les amplitudes sont deux fois plus grandes sont obtenues quatre fois plus souvent et ainsi de suite. Born énonce la règle de probabilité : pour une mesure individuelle, la probabilité d'obtenir comme résultat une valeur propre donnée est égale au carré de son amplitude. Les amplitudes de la théorie quantique sont nommées « amplitudes de probabilité ».

Les probabilités calculées pour les valeurs propres de position sont nommées « probabilités de présence ». Le paquet d'ondes lui-même est qualifié « d'onde de probabilité », de « nuage de probabilité » ou encore de « fluide de probabilité ».

### 3.2 Deuxième élément de solution : le postulat de réduction

Les résultats de mesures, d'observations et d'expériences, indiqués par les instruments, constituent de l'information sur la réalité. Ainsi, immédiatement après un acte de mesure, l'état d'une particule doit correspondre aux résultats obtenus : la particule doit alors se trouver dans un état propre commun aux grandeurs dynamiques mesurées (il est unique selon les grandeurs dynamiques mesurées et multiple selon celles qui n'ont pas été mesurées). Cet état est différent de celui que la théorie attribuait à la particule immédiatement avant la mesure, qui était multiple selon toutes les grandeurs dynamiques.

En 1932, John von Neumann postule que l'acte de la mesure perturbe la particule et modifie son état : cet acte provoque la *réduction* de l'état de la particule selon les grandeurs dynamiques mesurées. L'état réduit final est un fragment de l'état superposé initial, prélevé au hasard par l'ensemble des instruments qui ont agi simultanément sur la particule. Le postulat de réduction est purement descriptif : von Neumann ne propose aucun mécanisme qui explique cette réduction. La description théorique de l'état d'une particule doit être modifiée à la suite d'un acte de mesure : elle doit incorporer l'information acquise. Lorsque la grandeur dynamique position est mesurée, on parle de la « réduction du paquet d'ondes » ou encore de « l'effondrement de la fonction d'onde ».

Lorsqu'une grandeur dynamique discrète, comme le spin, est mesurée, toutes ses amplitudes deviennent nulles sauf une seule (qui donne alors une probabilité de 100%), celle qui est associée à la valeur propre égale au résultat de la mesure, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. Un état réduit selon une grandeur dynamique discrète est un état propre de celle-ci. Il s'agit d'un état classique (unique) selon celle-ci.

Lorsqu'une grandeur dynamique continue, comme la position ou la vitesse, est mesurée, toutes ses amplitudes deviennent nulles sauf celles (qui donnent alors une probabilité totale de 100%) qui sont associées au sous-continuum des valeurs propres comprises à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument (cette description s'applique à chacune des dimensions de l'espace). Le centre de ce sous-continuum de valeurs propres

est occupé par la valeur numérique affichée par l'instrument ; la largeur de ce sous-continuum correspond à la marge d'incertitude de l'instrument. L'existence d'une marge d'incertitude inhérente à tout instrument a pour conséquence qu'un état réduit selon une grandeur dynamique continue n'est pas, en toute rigueur, un état propre de celle-ci, mais un sous-continuum d'états propres de celle-ci dont l'étendue correspond à la marge d'incertitude de l'instrument. Il s'agit d'un état approximativement classique (approximativement unique) selon cette grandeur dynamique. Plus l'instrument employé est précis et plus ce sous-continuum d'états propres est étroit : plus l'état réduit se rapproche d'être classique (unique) selon cette grandeur dynamique.

### 3.3 Le double rôle de la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure

D'une part, appliquée au problème de la mesure, la relation de Heisenberg ( $\Delta x \Delta v \geq$  valeur minimale) interdit la réduction simultanée des ensembles de valeurs propres et d'amplitudes de la position et de la vitesse au-delà de la valeur minimale qu'elle spécifie. En pratique, cette valeur minimale est toujours atteinte lors d'un acte de mesure (à moins de travailler avec des instruments peu précis, dont le produit des marges d'incertitude soit supérieur à cette valeur minimale, ce qui n'est pas désirable). En pratique, la relation de Heisenberg interdit la mesure simultanée de la position et de la vitesse.

D'autre part, la relation de Heisenberg implique que, lorsque la valeur minimale qu'elle spécifie est atteinte, la mesure de l'une des deux grandeurs dynamiques fondamentales, en plus de provoquer la réduction de l'ensemble de valeurs propres et d'amplitudes de celle-ci, *entraîne automatiquement l'élargissement* de l'ensemble de valeurs propres et d'amplitudes de l'autre grandeur dynamique fondamentale, et ce, d'autant plus que l'instrument utilisé est précis. La relation de Heisenberg implique ainsi que l'acte de la mesure modifie bel et bien l'état de la particule. Mais attention ! Ce que la relation de Heisenberg implique, c'est que la mesure de l'une des deux grandeurs dynamiques fondamentales modifie l'*autre* : la mesure de l'une invalide l'information qui aurait été acquise sur l'autre par une mesure antérieure. La relation de Heisenberg ne dit cependant pas si la grandeur dynamique qui est elle-même mesurée est modifiée ou non par l'acte de la mesure. Elle ne dit pas si la réduction postulée par von Neumann correspond ou non à quelque chose de réel.

Reprenons l'exemple de la voiture quantique. Supposons que le policier effectue trois mesures consécutives : (1) celle de la vitesse de la voiture ; (2) celle de sa position ; (3) de nouveau celle de sa vitesse. On suppose que les intervalles de temps qui séparent ces trois mesures sont si courts que l'évolution de l'état de la voiture (de sa position et de sa vitesse) entre ces mesures peut être négligée.

Initialement, l'ensemble de valeurs propres de la position de la voiture s'étend de 70 à 130 m à l'est du point de départ et celui de sa vitesse de 66 à 74 km/h vers l'est. Le policier mesure d'abord la vitesse avec un radar, dont la marge d'incertitude est de  $\pm 0,1$  km/h. Le résultat de la mesure sera n'importe quelle valeur comprise entre 66 et 74 km/h vers l'est, obtenue au hasard et à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument. Supposons que le résultat de la mesure

est  $71,7 \pm 0,1$  km/h vers l'est. Immédiatement après la mesure, l'ensemble de valeurs propres attribué à la grandeur dynamique vitesse est réduit au sous-continuum s'étendant de 71,6 à 71,8 km/h vers l'est ; le centre de ce sous-continuum est occupé par le résultat de la mesure, 71,7 km/h vers l'est. Toutes les amplitudes de vitesse sont tombées à zéro sauf celles associées aux valeurs propres faisant partie de ce sous-continuum.

Immédiatement après la mesure, l'état de la voiture quantique est approximativement un état propre de vitesse, correspondant à la valeur propre 71,7 km/h vers l'est ; en toute rigueur, il est le sous-continuum d'états propres de vitesse correspondant au sous-continuum de valeurs propres s'étendant de 71,6 à 71,8 km/h vers l'est. La relation de Heisenberg implique que l'ensemble de valeurs propres de la position s'élargisse en conséquence ; immédiatement après la mesure, celui-ci contiendra, disons, toutes les valeurs propres entre 40 et 240 m à l'est du point de départ (on aura noté que la valeur numérique située au centre de l'ensemble de valeurs propres de la position a aussi été modifiée par la mesure de la vitesse). Dans cet exemple, le produit  $\Delta x \Delta v$  est initialement égal à  $60 \text{ m} \times 8 \text{ km/h} = 480 \text{ m} \times \text{km/h}$  ; immédiatement après la mesure de la vitesse, il est égal à  $200 \text{ m} \times 0,2 \text{ km/h} = 40 \text{ m} \times \text{km/h}$ . Dans cet exemple fictif, la valeur  $40 \text{ m} \times \text{km/h}$  est la valeur minimale fixée par la relation de Heisenberg.

Immédiatement après avoir mesuré la vitesse de la voiture, le policier mesure sa position avec un instrument dont la marge d'incertitude est  $\pm 1$  m. Cette seconde mesure provoquera la réduction de l'ensemble de valeurs propres de la position, qui s'étend immédiatement avant cette mesure de 40 à 240 m à l'est du point de départ, au sous-continuum qui s'étend, disons, de 61 à 63 m à l'est du point de départ (le résultat de la mesure étant  $62 \pm 1$  m à l'est du point de départ). Cette mesure entraîne automatiquement, en vertu de la relation de Heisenberg, l'élargissement de l'ensemble de valeurs propres de la vitesse, qui s'étendra immédiatement après cette seconde mesure, disons, de 55 à 75 km/h vers l'est. Immédiatement après la seconde mesure, le produit  $\Delta x \Delta v$  est toujours égal à la valeur minimale fixée par la relation de Heisenberg :  $2 \text{ m} \times 20 \text{ km/h} = 40 \text{ m} \times \text{km/h}$ .

Enfin, immédiatement après avoir mesuré la position de la voiture, le policier mesure à nouveau sa vitesse avec le même radar. Le résultat de cette nouvelle mesure donnera n'importe quelle valeur entre 55 et 75 km/h vers l'est, au hasard, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument ; disons  $59,2 \pm 0,1$  km/h vers l'est. Le résultat obtenu diffère de celui de la première mesure. La mesure de la position (la deuxième mesure) a invalidé l'information acquise sur la vitesse par une mesure antérieure (la première mesure) : cette information ( $71,7 \pm 0,1$  km/h vers l'est dans notre exemple) ne correspond plus à la réalité.

La relation de Heisenberg joue donc un double rôle dans le problème de la mesure : elle implique (a) l'impossibilité de mesurer simultanément les deux grandeurs dynamiques fondamentales et (b) le fait que la mesure de l'une modifie l'autre (à moins d'employer

des instruments peu précis dans les deux cas). La relation de Heisenberg fait ainsi des deux grandeurs dynamiques fondamentales des entités « incompatibles ».

Par ailleurs, aucune relation de type Heisenberg ne relie le spin à la position ni à la vitesse : l'ensemble de valeurs propres et d'amplitudes du spin peut être réduit simultanément à celui de la position ou de la vitesse, sans restriction. Le spin est « compatible » avec chacune des deux grandeurs dynamiques fondamentales : il peut être mesuré simultanément à l'une ou l'autre. Lorsque deux grandeurs dynamiques sont compatibles, la mesure de l'une ne modifie pas l'autre : elle n'invalide pas l'information qui aurait été acquise sur l'autre par une mesure antérieure, mais la complète.

### **3.4 L'effet de l'observateur en mécanique quantique**

On emploie parfois l'expression « effet de l'observateur en mécanique quantique » pour désigner, ensemble, (1) la réduction aléatoire de l'état superposé d'une particule selon les grandeurs dynamiques qui sont mesurées simultanément et (2) le double rôle joué par la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure, soit (a) l'impossibilité de mesurer simultanément les deux grandeurs dynamiques fondamentales et (b) le fait que la mesure de l'une modifie l'autre (à moins, dans les deux cas, d'employer des instruments peu précis).

Notons qu'en physique, le terme « observation » ne désigne pas automatiquement une perception réalisée dans la conscience d'un expérimentateur, un phénomène psychologique : il désigne d'abord et avant tout une interaction entre un objet et un instrument, un phénomène physique. De même, le terme « observateur » ne désigne pas automatiquement l'expérimentateur, doté d'une conscience : il désigne d'abord et avant tout l'instrument, un objet inanimé.

## Chapitre 4

### L'évolution de l'état d'un objet

#### 4.1 Un seul type d'évolution en physique classique

En physique classique, il n'y a pas de problème de la mesure. L'état (spécifié par la position et la vitesse) d'un corps suit en tout temps un seul et même type d'évolution, indépendamment que le corps soit « observé » ou non. Cette évolution, dite « unitaire », présente quatre caractéristiques principales. (1) Elle est continue. (2) Elle s'effectue sur des intervalles de temps (elle n'est pas instantanée). (3) Elle est déterministe. (4) Elle est réversible dans les situations simples mais irréversible dans les situations complexes.

Le mouvement du centre de masse d'un corps est une trajectoire, c'est-à-dire une ligne, droite ou courbe, tracée dans l'espace en fonction du temps par la succession des points d'espace uniques occupés par ce centre de masse.

En physique classique, l'évolution unitaire d'un corps est régie par la deuxième loi de Newton, selon laquelle la force totale agissant sur un corps est égale au produit de sa masse et de son accélération ( $F_{tot} = ma$ ). Cette loi implique la première loi de Newton ou loi de l'inertie : lorsque la force totale agissant sur un corps est nulle, celui-ci se déplace en ligne droite et à vitesse constante (il n'accélère pas).

#### 4.2 Deux types d'évolution en physique quantique

Avec le problème de la mesure et sa solution (la règle de probabilité et le postulat de réduction), la théorie quantique se trouve à octroyer à l'acte d'observation un statut spécial. En physique quantique, l'état (spécifié par la position, la vitesse et le spin) d'une particule suivra l'un ou l'autre de deux types d'évolution possibles, selon que la particule est « observée » ou non, selon qu'elle subit « l'effet de l'observateur » ou non.

##### (A) Particule non observée

Tant qu'une particule n'est pas observée, le problème de la mesure ne se pose pas. L'état superposé (selon toutes les grandeurs dynamiques) d'une particule non observée suit une évolution unitaire analogue à celle de l'état unique d'un corps et présente les mêmes quatre caractéristiques principales. (1) Elle est continue. (2) Elle s'effectue sur des intervalles de temps (elle n'est pas instantanée). (3) Elle est déterministe. (4) Elle est réversible dans les situations simples mais irréversible dans les situations complexes.

Le mouvement d'une particule, assimilée à un objet ponctuel, n'est pas une trajectoire mais une propagation ondulatoire.

On peut comparer la propagation ondulatoire d'une particule à l'onde circulaire que l'on produit à la surface d'un lac lorsque l'on y jette un caillou. Dans cette analogie, la particule, assimilée à un objet ponctuel, occuperait simultanément

tous les points d'espace couverts par l'onde (cette onde étant représentée, dans la théorie, par le paquet d'ondes), et cela, à chaque instant qui passe. Précisons que cette analogie illustre une situation quantique simplifiée à deux dimensions d'espace, celles dans lesquelles s'étend la surface du lac. La direction « haut-bas » dans cette analogie ne représente pas une troisième dimension d'espace, mais sert seulement à illustrer les amplitudes distribuées dans le paquet d'ondes à deux dimensions.

En physique quantique, l'évolution unitaire d'une particule non observée est régie par l'équation de Schrödinger (la règle de probabilité de Born ne s'applique pas : il n'y a pas de hasard). Cette équation implique la loi de l'inertie, transposée aux particules : lorsque la force totale qui agit sur une particule est nulle (on dit alors que la particule est libre), le paquet d'ondes qui la représente se déplace en ligne droite et à vitesse constante. De plus, dans ce cas, l'équation de Schrödinger implique que le paquet d'ondes s'étale en se propageant, à l'instar de toute onde qui s'étale naturellement en se propageant. Le rythme d'étalement d'un paquet d'ondes libre correspond à la largeur effective  $\Delta\nu$  du spectre de de Broglie : plus  $\Delta\nu$  est grand et plus le paquet d'ondes s'étale rapidement en se propageant. Indiquons enfin que pour un paquet d'ondes libre, la largeur effective  $\Delta\nu$  du spectre de de Broglie demeure constante dans le temps, tout comme la vitesse et la direction du mouvement.

### (B) Particule observée

Lorsqu'une particule est observée, nous sommes confrontés au problème de la mesure. L'état d'une particule observée suit une évolution décrite par la solution au problème de la mesure et nommée « réduction non unitaire ». Cette évolution présente quatre caractéristiques principales. (1) Elle est discontinue. (2) Elle s'effectue instantanément. (3) Elle est aléatoire. (4) Elle est toujours irréversible.

En physique quantique, la réduction non unitaire d'une particule observée est régie par la règle de probabilité de Born (l'équation de Schrödinger ne s'applique pas).

L'état réduit dans lequel se trouve une particule (assimilée à un objet ponctuel) immédiatement après un acte d'observation constitue le point de départ d'une nouvelle évolution unitaire. L'état réduit de la particule évoluera spontanément vers un nouvel état superposé, différent de celui dans lequel la particule se trouvait immédiatement avant qu'elle soit observée.

### **4.3 Le hasard en mécanique quantique**

Avec le problème de la mesure en mécanique quantique et sa solution (la réduction non unitaire), le hasard, absent de la théorie classique, a fait son entrée dans la physique. Précisons que la seule place que la théorie quantique accorde au hasard se situe dans l'acte d'observation. La signification du hasard en mécanique quantique n'est toujours pas élucidée : s'agit-il seulement d'une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité », d'un hasard fictif traduisant un état d'ignorance partielle ou totale de

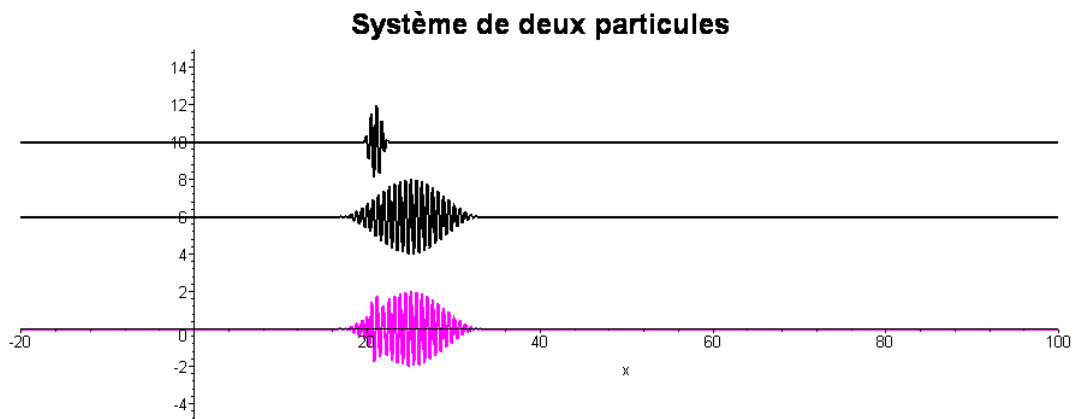
l'expérimentateur devant un phénomène déterministe, ou d'un hasard réel, inhérent à « ce que la réalité est et fait » ?

## Chapitre 5

### Compléments à la théorie quantique

#### 5.1 L'intrication

Un paquet d'ondes est lui-même une onde, soit l'onde unique qui résulte de la superposition des ondes de de Broglie. À l'instar de toutes les ondes, les paquets d'ondes peuvent eux aussi se superposer (s'additionner) : des paquets d'ondes qui se chevauchent perdent leur individualité et fusionnent en un unique paquet d'ondes résultant. La figure suivante en donne un exemple simplifié et à une dimension d'espace. Si les deux premiers paquets d'ondes se chevauchent, ils perdent leur individualité, fusionnent et donnent le troisième paquet d'ondes.



Or, en mécanique quantique, un paquet d'ondes représente la situation d'une particule dans l'espace-temps (sa position et sa vitesse). Il existe des situations où les paquets d'ondes représentant deux particules se superposent, avec la conséquence que par la suite, ces deux particules sont représentées conjointement et de manière indissociable par un seul et unique paquet d'ondes résultant ! Cet élément de la théorie est nommé « intrication ».

#### 5.2 Cohérences, superposition d'états et mélange statistique d'états

##### (A) Les cohérences

Les états propres d'une grandeur dynamique donnée (position, vitesse, spin...) qui sont présents dans le même état superposé coexistent et sont interdépendants : on dit qu'ils interfèrent les uns avec les autres. Ces effets d'interférence sont représentés, dans la théorie, par des termes mathématiques nommés « cohérences ». Dans un état superposé, on calcule une cohérence pour chaque paire d'états propres de chaque grandeur dynamique, donc entre chaque état propre d'une grandeur dynamique donnée et chacun des autres états propres de la même grandeur dynamique. On calcule ainsi une cohérence

entre chaque paire de points d'espace couverts par le paquet d'ondes, entre chaque paire de mouvements (en vitesse et en direction) représentés dans le spectre de de Broglie, entre chaque paire de spins.

Une cohérence entre deux états propres d'une grandeur dynamique donnée se calcule à partir des amplitudes que la théorie leur octroie. Tout comme les amplitudes, les cohérences peuvent changer dans le temps et selon les circonstances.

### (B) Superposition d'états et mélange statistique d'états

La notion de cohérence en mécanique quantique nous mène à établir une distinction entre deux concepts, celui de « superposition d'états » (ou d'« état superposé ») et celui de « mélange statistique d'états ». Ces deux concepts désignent des états composés d'une multiplicité d'états propres (selon toutes les grandeurs dynamiques) ; ils se distinguent par les cohérences. Dans une superposition d'états, les cohérences sont non-nulles entre les états propres de toutes les grandeurs dynamiques, alors que dans un mélange statistique d'états, il existe des cohérences nulles (ou du moins qui tendent vers zéro) entre les états propres d'une ou de plusieurs grandeurs dynamiques.

Cette distinction suggère ceci. D'une part, comme nous l'avons déjà dit, dans une superposition d'états, les états propres coexistent et sont interdépendants, ils interfèrent les uns avec les autres. Une superposition d'états *serait* effectivement un élément de la réalité : tous les états propres qui y sont présents *seraient* simultanément réels. D'autre part, dans un mélange statistique d'états, les états propres d'au moins une grandeur dynamique (position, vitesse, spin...) n'interfèrent pas (puisque les cohérences entre eux sont nulles) : ils sont indépendants les uns des autres, ils ne coexistent pas. Lorsque l'on a affaire à un mélange statistique d'états, un seul des états propres d'une telle grandeur dynamique *serait* réel, mais la théorie *serait* incapable de dire lequel.

La différence entre une « superposition d'états » et un « mélange statistique d'états » est équivalente à la différence entre les conjonctions « ET » et « OU ». Faisons une analogie. Entre l'instant où un dé est lancé et l'instant où il s'immobilise sur une table, il virevolte. La virevolte d'un « dé classique » est décrite par l'alternance continue de la face unique qui est présentée au joueur ; la virevolte d'un « dé quantique » devrait être décrite par la présentation simultanée des six faces au joueur, à chaque instant. Un dé quantique qui virevolte se trouverait ainsi dans la superposition d'états suivante :

$$| 1 \rangle \text{ ET } | 2 \rangle \text{ ET } | 3 \rangle \text{ ET } | 4 \rangle \text{ ET } | 5 \rangle \text{ ET } | 6 \rangle .$$

Le symbole mathématique  $| \rangle$  se nomme un « ket » et sert à désigner un état quantique. La représentation de l'état d'un objet quantique donnée en termes de kets se nomme un « vecteur d'état ». Dans le cas des grandeurs dynamiques position et vitesse, la représentation donnée par un vecteur d'état est équivalente à celle donnée par une fonction d'onde (qui est l'équation d'un paquet d'ondes) ou à celle donnée par une fonction de vitesse (qui est l'équation d'un spectre de de Broglie).

Nous avons considéré ici la grandeur dynamique « face présentée au joueur » du dé. Lorsqu'un dé quantique virevolte, les états propres de cette grandeur dynamique interfèrent les uns avec les autres. Ils coexistent et sont interdépendants.

Une fois immobilisé sur la table, le dé quantique (à l'instar du dé classique) présente une face unique au joueur. Si le joueur n'observe pas le résultat obtenu, il décrira l'état du dé quantique immobilisé par le mélange statistique d'états :

$$|1\rangle \text{ OU } |2\rangle \text{ OU } |3\rangle \text{ OU } |4\rangle \text{ OU } |5\rangle \text{ OU } |6\rangle.$$

Les effets d'interférence entre les états propres ont été graduellement détruits pendant que le dé s'immobilisait sur la table. Lorsque le dé est immobilisé, les états propres sont devenus indépendants les uns des autres ; ils ne coexistent plus.

Cet exemple constitue une analogie de la mesure d'une grandeur dynamique discrète, comme le spin, la table jouant le rôle de l'instrument.

### 5.3 La théorie de la décohérence

Le terme « décohérence » désigne la destruction des cohérences, dans un état superposé, entre les états propres d'une ou de plusieurs grandeurs dynamiques. Ce phénomène se produit notamment lorsqu'une grandeur dynamique est mesurée, comme dans l'analogie du dé quantique de la section précédente. De manière générale, un acte de mesure transforme la superposition d'états d'une particule en un mélange statistique d'états réduits selon les grandeurs dynamiques mesurées. Un seul des états réduits du mélange statistique est enregistré par le dispositif expérimental, au hasard, et devient le résultat de la mesure. L'état de la particule observée demeure superposé selon les grandeurs dynamiques non mesurées.

La théorie de la décohérence constitue le troisième élément de solution au problème de la mesure. Alors que les deux premiers éléments de solution, la règle de probabilité et le postulat de réduction, se limitaient à décrire la transition d'état superposé à état réduit (selon les grandeurs dynamiques mesurées), la théorie de la décohérence va plus loin et apporte une explication (à ce jour partielle) à cette transition. La théorie de la décohérence propose une cause : ce sont les interactions entre, d'une part, le système constitué de la particule observée et du dispositif expérimental et, d'autre part, son environnement qui détruisent les cohérences entre les états propres des grandeurs dynamiques qui sont en train d'être mesurées, donc qui causent la réduction de l'état de la particule observée selon ces grandeurs dynamiques. L'environnement désigne les particules qui bombardent continuellement le dispositif expérimental : molécules d'air, photons (particules de lumière) provenant de diverses sources lumineuses, photons du rayonnement de fond cosmologique, rayons cosmiques (particules de matière provenant de l'espace, notamment du Soleil), etc. Selon la théorie de la décohérence, l'environnement participe de manière inhérente au processus de la mesure. Si les deux

premiers éléments de solution au problème de la mesure ne vont pas au-delà de la description, c'est qu'ils ne tiennent pas compte de l'environnement, comme si la particule observée et le dispositif expérimental étaient isolés. Dans l'analogie du dé quantique de la section précédente, la participation des particules de l'environnement est requise pour que le dé s'immobilise sur la table.

La théorie de la décohérence a été formulée initialement par David Bohm en 1952. Celui-ci considérait que la description quantique de l'état d'une particule est incomplète et visait à remédier à ce problème en proposant une « théorie à variables cachées non-locales ». La théorie de la décohérence fut reprise par Hugh Everett III en 1957 et constitue l'un des fondements de sa « théorie de la fonction d'onde universelle ». Ce n'est qu'à partir des travaux de H. Dieter Zeh, en 1970, et de Wojciech Hubert Zurek, en 1981, que la théorie de la décohérence prend véritablement son essor. En 2009, elle a beaucoup progressé, mais demeure inachevée et est toujours objet de recherche.

#### (A) Une physique quantique universelle

La théorie de la décohérence se fonde sur l'hypothèse de l'universalité de la physique quantique. Tout élément de la réalité, particule quantique, corps classique, système quantique et classique et jusqu'à l'Univers lui-même, serait fondamentalement un objet quantique. La théorie quantique serait la théorie générale de la réalité ; la théorie classique en serait un cas particulier, ou limite.

#### (B) Deux questions laissées sans réponse

La théorie de la décohérence, dans son état actuel, laisse sans réponse deux questions fondamentales. (1) Pourquoi est-ce tel état réduit du mélange statistique qui est enregistré par le dispositif expérimental plutôt que tel autre ? (2) Qu'advient-il des autres états réduits du mélange statistique, ceux qui ne sont pas enregistrés par le dispositif expérimental ?

#### (C) Interactions naturelles entre un objet quantique et son environnement

Le domaine d'application de la théorie de la décohérence dépasse le seul problème de la mesure et englobe les interactions naturelles entre tout objet quantique et son environnement. Il couvre, par exemple, l'évolution d'un proton dans le gaz de particules au cœur du Soleil. De manière générale, toute interaction entre une particule et au moins une autre particule peut provoquer, de manière spontanée, la décohérence (réduction) selon certaines grandeurs dynamiques, et cela, pour toutes les particules impliquées.

Selon la théorie de la décohérence, les actes d'observation et les interactions naturelles entre un objet quantique et son environnement constituent une seule et même catégorie de phénomènes. Avec la théorie de la décohérence, la théorie quantique fait perdre à l'acte d'observation le statut spécial qu'elle lui avait accordé sur la base du problème de la mesure et des deux premiers éléments de sa solution (la règle de probabilité et le postulat de réduction). « L'effet de l'observateur » en mécanique quantique devient un cas

particulier d'un phénomène général, « l'effet de l'environnement ». La théorie de la décohérence joue un rôle unificateur à l'intérieur de la théorie quantique.

#### (D) La supersélection induite par l'environnement

Le fait que la cause de la décohérence (de la réduction) soit l'interaction entre un objet quantique, qu'il s'agisse d'une particule, d'un corps, d'un système naturel ou d'un sous-système intriqué « particule – dispositif expérimental », et son environnement soulève une question fondamentale : comment les grandeurs dynamiques qui subissent la décohérence sont-elles sélectionnées ?

Selon la théorie de la décohérence, c'est la dynamique même de l'interaction entre un objet quantique et son environnement qui opère cette sélection, de manière spontanée. Ce processus, nommé « supersélection induite par l'environnement », n'est, à ce jour, que partiellement élucidé. Dans le cas d'un acte d'observation, la nature et le fonctionnement des instruments employés jouent évidemment le rôle déterminant dans ce processus de sélection, chaque instrument étant conçu pour mesurer une grandeur dynamique spécifique. La supersélection induite par l'environnement et la décohérence (la réduction) selon les grandeurs dynamiques sélectionnées se déroulent simultanément et constituent un processus global.

Dans la nature, aucun objet ne peut demeurer indéfiniment isolé de son environnement. La supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées constituent un processus normal qui survient continuellement dans l'évolution de tout objet.

L'effet de l'environnement, dans le cas général, et l'effet de l'observateur, un cas particulier, ne sont rien d'autre que la supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées.

#### (E) Un seul type d'évolution en mécanique quantique

Avec les deux premiers éléments de solution au problème de la mesure (la règle de probabilité et le postulat de réduction), la théorie quantique prédisait qu'une particule suit l'un ou l'autre de deux types d'évolution, selon qu'elle est « observée » ou non : lorsqu'une particule n'est pas en train d'être observée, elle suit une évolution unitaire, déterministe et régie par l'équation de Schrödinger ; lorsqu'elle est en train d'être observée, une réduction non unitaire, aléatoire et régie par la règle de probabilité de Born.

Selon la théorie de la décohérence, troisième élément de solution au problème de la mesure, les actes d'observations sont des phénomènes de même nature que les interactions naturelles (non observées !) entre un objet quantique et son environnement. La réduction non unitaire devient un cas particulier d'évolution unitaire. Le rôle unificateur joué par la théorie de la décohérence à l'intérieur de la théorie quantique implique que l'état d'un objet quantique, à l'instar de l'état d'un objet classique, suit en

tout temps un seul et même type d'évolution, unitaire, indépendamment que l'objet quantique soit observé ou non.

La supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées présentent ainsi les quatre caractéristiques principales de toute évolution unitaire. (1) Le processus global qu'elles constituent est continu. (2) Ce processus global s'effectue sur des intervalles de temps (il n'est pas instantané), que la théorie de la décohérence permet de calculer. Le temps de décohérence varie selon les grandeurs dynamiques et les circonstances. Il dépend aussi de la masse de l'objet quantique : il est d'autant plus court que l'objet quantique est massif (il est à toutes fins pratiques instantané dans le cas d'un objet macroscopique). (3) Ce processus global est déterministe. (4) Ce processus global est toujours irréversible.

#### (F) Décohérence et hasard

La théorie de la décohérence, dans son état actuel, est incapable de prédire lequel des états réduits d'un mélange statistique est réel. Ainsi, bien que la transition d'un état superposé à un mélange statistique d'états réduits (selon les grandeurs dynamiques sélectionnées) constitue un processus déterministe, l'issue de ce processus, c'est-à-dire lequel des états réduits est réel, est aléatoire. Avec la théorie de la décohérence, on doit toujours recourir à la règle de probabilité de Born pour prédire l'issue d'une réduction, que celle-ci soit naturelle ou artificielle.

La théorie de la décohérence apporte ainsi deux modifications à la place accordée au hasard par la théorie quantique. D'une part, cette place est rétrécie à l'issue du processus de la réduction, au « choix », dans un mélange statistique, de l'état réduit qui est réel. Avant la théorie de la décohérence, la place accordée au hasard couvrait le processus de la réduction dans sa totalité. D'autre part, cette place est étendue aux interactions naturelles entre les objets quantiques et leur environnement. Avant la théorie de la décohérence, elle était limitée aux actes d'observation.

La théorie de la décohérence n'élucide pas la signification du hasard en mécanique quantique : est-il inhérent à « ce que la réalité est et fait » ou s'agit-il d'une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » ?

#### **5.4 La transition quantique-classique**

Il existe une seule réalité et cela appelle une unité de la physique. Il doit exister un lien théorique qui fait le pont entre les deux grandes branches de cette science que sont les physiques classique (qui inclut les théories de la relativité restreinte et générale, en tant qu'extension) et quantique.

Adoptons le point de vue sur lequel se fonde la théorie de la décohérence, soit l'idée que la physique quantique est universelle et la physique classique en est un cas particulier ou limite. Selon ce point de vue, tout objet pouvant être décrit par la théorie classique, une théorie restreinte, doit automatiquement pouvoir être décrit par la théorie quantique, une

théorie générale qui englobe et dépasse la précédente. Les deux descriptions doivent être équivalentes. Ce doit être le cas des corps : tout objet classique doit appartenir à la catégorie générale des objets quantiques. Par contre, un objet pouvant être décrit par la théorie quantique ne pourra pas automatiquement être décrit par la théorie classique. Ce sera le cas de particules : il existera des objets quantiques qui n'entreront pas dans la catégorie restreinte des objets classiques.

Il existe des éléments de la théorie quantique qui rendent effectivement équivalentes les descriptions quantique et classique de l'état d'un objet dans le cas du centre de masse d'un corps, mais non dans le cas d'une particule. Ils rendent possible la transition de la description quantique de l'état d'un objet à la description classique. Ce sont notamment le principe de correspondance, un ensemble de règles mathématiques qui relient les formalismes mathématiques quantique et classique, et la théorie de la décohérence. En 2009, la transition quantique-classique n'est que partiellement élucidée ; elle est toujours objet de recherche.

#### (A) Les échelles de la réalité

Étant donné que la physique est divisée en deux grandes branches, la physique classique et quantique, on divise la réalité en deux échelles correspondantes. Bien entendu, ces deux échelles constituent ensemble une réalité unique et globalement cohérente. Tel qu'il en a été discuté dans la section 1.1, il est commode – et même habituel – de définir l'échelle classique de la réalité comme celle des objets macroscopiques, les corps et les systèmes classiques, et l'échelle quantique comme celle des objets microscopiques, les particules et les systèmes quantiques. Mais il faut garder à l'esprit que ces définitions ne sont qu'approximatives.

En 2009, il n'existe toujours pas de définitions rigoureuses des échelles quantique et classique de la réalité. On peut cependant s'inspirer de l'idée sur laquelle se fonde la théorie de la décohérence, l'idée selon laquelle la physique quantique est universelle et la physique classique en est un cas particulier ou limite, et identifier l'échelle quantique de la réalité avec la réalité elle-même, dans sa totalité, et considérer l'échelle classique comme un sous-domaine de la précédente. On peut faire une analogie avec un iceberg : l'iceberg, dans sa totalité, représente l'échelle quantique de la réalité et sa partie émergée l'échelle classique. La surface de l'eau représente la transition quantique-classique.

#### (B) De la physique classique à la physique quantique

Contrairement à ce que certains philosophes et sociologues des sciences affirment ou sous-entendent, il n'y a pas de rupture, de conflit ou de contradiction entre la physique classique et quantique. Ces deux physiques ne sont pas incommensurables, c'est-à-dire dépourvues de commune mesure, impossibles à comparer l'une avec l'autre, comme le prétend entre autres le philosophe des sciences Thomas Kuhn. Elles sont, au contraire, liées l'une à l'autre par le principe de correspondance et à la théorie de la décohérence, qui permettent la transition quantique-classique (il est vrai que le rapport entre les physiques quantique et classique n'est pas encore complètement élucidé en 2009), et

constituent, ensemble (et en principe), une seule et unique science globalement cohérente, la physique.

La physique quantique ne constitue pas une réfutation de la physique classique, mais plutôt une généralisation : elle englobe cette dernière comme un cas particulier ou limite, et la dépasse. D'ailleurs, la physique classique, depuis Newton, a amplement été prouvée, par plus de trois siècles de mesures, d'observations et d'expériences ! La mécanique newtonienne a notamment permis de faire se poser des humains sur la Lune et de les ramener vivants sur Terre. Comment une nouvelle théorie qui contredirait la théorie classique à l'échelle classique de la réalité pourrait-elle être compatible avec toutes ces données ?

Ce que l'arrivée de la physique quantique a remis en question, ce n'est pas la physique classique en elle-même, mais son domaine de validité. Elle est venue indiquer les limites, floues, de ce dernier. Avant la découverte de la physique quantique, on croyait la physique classique universelle. Maintenant, on sait que son domaine de validité est limité, de manière approximative, aux objets macroscopiques. De la physique classique à la physique quantique, il n'y a pas rupture ni incommensurabilité : il y a continuité et progrès. La physique étant une science encore inachevée, il faut s'attendre à ce que des découvertes futures fassent subir à la physique quantique un sort similaire à celui qu'elle a fait subir à la physique classique.

# Deuxième partie

## La philosophie

### Chapitre 6

#### Introduction à la philosophie de la mécanique quantique

##### 6.1 Trois questions centrales

(1) La question du problème de la réalité. Quels sont les éléments de la réalité ? Qu'est-ce qui existe ? Les éléments de la réalité ne peuvent pas être déterminés par des considérations philosophiques *a priori*, par la seule réflexion, mais doivent être trouvés par un appel aux résultats de mesures, d'observations et d'expériences, telles une tache qui apparaît sur un écran, une valeur numérique indiquée par une aiguille sur un cadran, etc.

(2) La question du rapport entre la théorie et la réalité. Quelle signification doit-on donner aux éléments de la théorie ? Quelles sont les correspondances entre les éléments de la théorie et ceux de la réalité ?

(3) La question du caractère complet ou incomplet de la description quantique de l'état d'une particule. Est-ce que tous les éléments de la réalité sont représentés par un élément correspondant de la théorie ?

##### 6.2 Sept principes classiques

Notre conception de l'échelle classique de la réalité repose sur sept principes issus de notre intuition, elle-même fondée sur l'observation de la réalité à notre échelle, par l'entremise de nos sens et d'instruments. La physique classique, confirmée pour l'échelle classique de la réalité par plus de trois siècles de mesures, d'observations et d'expériences, est fondée sur ces sept principes.

(1) **Le principe d'objectivité** : la réalité matérielle est indépendante de l'esprit, qu'il s'agisse de l'esprit humain ou d'un supposé esprit d'ordre supérieur telle une divinité. Le principe d'objectivité est le principe premier de la science. Sa première mise en application dans l'histoire, par Thalès de Milet vers 600 av. J.-C., marque la naissance de la science.

(2) **Le principe du réalisme** : tout objet existe, possède ses propriétés et évolue dans le temps par lui-même, indépendamment qu'il soit observé ou non (que ce soit par un être doté de conscience ou par un instrument inanimé), que ses propriétés soient connues ou

non par un être doté de conscience et indépendamment de la volonté de tels êtres. Le principe du réalisme est accompagné des deux principes suivants.

(3) **Le principe de l'espace-temps** : tout objet est toujours présent dans l'espace-temps. La situation d'un objet dans l'espace-temps est spécifiée par les deux grandeurs dynamiques fondamentales, la position et la vitesse (l'immobilité étant considérée en physique comme un cas particulier de mouvement).

(4) **Le principe du tiers exclu expérimental** : la totalité des objets qui composent l'échelle classique de la réalité se séparent en deux types d'entités, les corps et les champs. Un objet classique peut se manifester dans l'espace-temps sous l'aspect unique et constant soit d'un corps (solide, liquide ou gazeux), soit ou d'un champ (qui peut se propager sous la forme d'une onde). En physique classique, il existe deux sortes de champ : le champ électromagnétique et le champ gravitationnel. La lumière n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique se propageant à l'intérieur de l'espace-temps. Selon la théorie de la relativité générale, il existerait aussi des ondes gravitationnelles et celles-ci seraient des oscillations de l'espace-temps lui-même. Il n'existe pas un troisième type d'entité : le tiers est exclu.

La découverte, au début du 20<sup>e</sup> siècle, du principe *quantique* de la dualité onde-corpuscule à l'échelle des particules a constitué la réfutation du principe *classique* du tiers exclu expérimental à cette échelle (cela n'implique pas sa remise en question à l'échelle classique). La découverte de la dualité onde-corpuscule marque la naissance de la physique quantique. La question de l'applicabilité du principe du tiers exclu expérimental à l'échelle quantique n'est donc pas discutée par les interprétations philosophiques. Notons qu'une définition rigoureuse et faisant consensus du principe de la dualité onde-corpuscule n'existe pas encore.

(5) **Le principe de causalité** : tout événement est l'effet d'une cause. Le principe de causalité est accompagné des deux principes suivants.

(6) **Le principe du déterminisme** : une même cause produit le même effet, partout et toujours. Nous appliquons implicitement ce principe dans chaque geste que nous posons.

(7) **Le principe de localité** : l'effet ne peut pas précéder la cause. D'une part, une cause ne peut produire un effet instantané que localement, au lieu même où elle survient. D'autre part, une cause peut produire un effet en un lieu distant, mais seulement après un certain délai, le temps pris par un signal physique pour se propager du lieu de la cause au lieu de l'effet localement, de point en point dans l'espace, à une vitesse toujours inférieure ou égale à celle de la lumière dans le vide.

Par exemple, une bombe explosant ici peut faire éclater instantanément la fenêtre contre laquelle elle est déposée. Cette bombe peut aussi faire éclater une fenêtre située là-bas (disons à 20 mètres de distance), mais seulement après un certain délai, le temps que prenne le souffle de l'explosion pour se propager d'ici à là-bas à une vitesse inférieure à celle de la lumière dans le vide.

Rappelons que de la physique classique à la physique quantique, il n'y a pas rupture ni incommensurabilité : il y a continuité et progrès. La physique quantique ne réfute pas la physique classique : elle la généralise, elle l'englobe et la dépasse. La description des phénomènes classiques donnée par la théorie quantique est équivalente à celle donnée par la théorie classique en vertu de la transition quantique-classique (voir la section 5.4). Ainsi, appliquée à l'échelle classique de la réalité, la physique quantique implique elle-même ces sept principes. Mais les implique-t-elle aussi à l'échelle quantique ?

### **6.3 La controverse Bohr-Einstein**

Le point de départ et le cœur des débats philosophiques sur la signification de la mécanique quantique se situent dans la série d'échanges qui ont eu lieu entre les physiciens Niels Bohr et Albert Einstein de 1920 à 1935 et que l'on désigne par l'expression « controverse Bohr-Einstein ». Tout au long de leurs échanges, Bohr et Einstein contribueront à développer deux interprétations philosophiques opposées, respectivement l'interprétation de Copenhague et l'interprétation statistique (ou d'ensemble).

Selon Bohr, il ne faut, à l'échelle quantique de la réalité, rien de moins que renoncer aux principes classiques du réalisme, de l'espace-temps, de la causalité et du déterminisme ! Les échelles quantique et classique de la réalité sont radicalement différentes. Einstein s'oppose vivement à cette vision, soutenant qu'il n'y a qu'une seule réalité et que celle-ci est ordonnée. Par conséquent, ces quatre principes classiques doivent s'appliquer autant à l'échelle quantique que classique. Bohr et Einstein ne réussiront pas à se mettre d'accord ; chacun restera sur sa position à partir de 1935. En 2009, la controverse Bohr-Einstein demeure non résolue, bien qu'elle ait reçu entre-temps un nouvel éclairage qui implique le principe classique de localité et dont nous discuterons aux chapitres 13 et 14.

## **Chapitre 7**

### **L'interprétation statistique (ou interprétation d'ensemble)**

Dès le moment où Max Born présente la règle de probabilité, en 1926, Albert Einstein se montre sceptique. Il écrit à ce dernier, la même année, qu'il est convaincu que « Dieu ne joue pas aux dés ». Selon la légende, Niels Bohr aurait répliqué : « Einstein, ne dites pas à Dieu quoi faire ».

Einstein considère qu'une théorie qui fait des prédictions aléatoires plutôt que déterministes ne peut pas être une théorie physique fondamentale. La mécanique quantique serait destinée à n'être qu'une théorie transitoire, dans l'attente de la découverte d'une théorie physique véritablement fondamentale, qui sera déterministe comme la physique classique.

Indiquons que l'interprétation statistique (ou d'ensemble) a été formulée bien avant l'arrivée de la théorie de la décohérence en 1952 et dont le développement commence véritablement en 1981 ; forcément, elle ne l'intègre pas.

#### **7.1 Point de départ : six principes classiques**

Le fondement de l'interprétation statistique (ou d'ensemble) est l'hypothèse philosophique selon laquelle les principes classiques d'objectivité, du réalisme, de l'espace-temps, de causalité, du déterminisme et de localité s'appliquent tels quels à l'échelle quantique de la réalité, comme à l'échelle classique. La réalité est une. C'est en tenant pour acquis ces six principes qu'une signification est ensuite donnée au formalisme mathématique de la mécanique quantique.

#### **7.2 Les éléments de la réalité**

Les éléments de la réalité doivent être trouvés par un appel aux résultats de mesures, d'observations et d'expériences. Or, en mécanique quantique, n'importe quelle grandeur dynamique peut être mesurée n'importe quand, à volonté, et le résultat de la mesure est toujours une valeur numérique unique obtenue à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument.

En vertu des principes d'objectivité et du réalisme, on dira qu'une particule existe, possède ses propriétés et évolue par elle-même, indépendamment qu'elle soit observée ou non. En vertu du principe de l'espace-temps, on dira qu'elle est toujours présente dans l'espace-temps. Enfin, en vertu du caractère unique de tout résultat de mesure, d'observation et d'expérience, on conclura que l'état d'une particule, dans la réalité, est toujours classique (unique), de manière exacte et non approximative, et cela, selon toutes les grandeurs dynamiques simultanément (position, vitesse, spin...), à l'instar de l'état d'un corps.

### 7.3 Une description incomplète

En physique quantique, toutes les grandeurs dynamiques devraient, en principe, être représentées par des valeurs numériques uniques simultanément et en tout temps, comme en physique classique. Or, non seulement ce n'est pas le cas, mais il y a pire : un élément de la théorie quantique, la relation de Heisenberg, interdit que des valeurs numériques uniques soient octroyées simultanément à la position et à la vitesse.

On doit en déduire que la description que donne la théorie quantique de l'état d'une particule est intrinsèquement incomplète. Il subsiste en tout temps au moins un élément de la réalité, la position ou la vitesse d'une particule, qui ne peut pas être représenté par un élément correspondant de la théorie (par une valeur numérique unique). La connaissance de l'une des deux grandeurs dynamiques fondamentales exclut la connaissance de l'autre. La relation de Heisenberg constitue une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » : elle est un symptôme du caractère incomplet de la description quantique de la réalité.

### 7.4 Le problème de la mesure et sa solution

En vertu des principes de causalité et du déterminisme, il n'existe aucun hasard dans la réalité. Le hasard de la théorie quantique, incarné par les deux premiers éléments de solution au problème de la mesure (la règle de probabilité et le postulat de réduction), est un hasard fictif traduisant l'état d'ignorance partielle de l'expérimentateur devant l'état d'une particule non observée. L'acte de la mesure consiste en la lecture passive, par l'instrument et à l'intérieur de sa marge d'incertitude, d'une propriété que la particule possède déjà par elle-même. Il ne modifie pas la grandeur dynamique mesurée. Le problème de la mesure (comment un résultat unique émerge-t-il au hasard d'une multiplicité de possibilités, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument ?) et les deux premiers éléments de sa solution ne correspondent à aucune réalité : ils représentent uniquement le changement qui survient dans la connaissance qu'a l'expérimentateur de l'état de la particule observée au moment où il prend conscience des résultats indiqués par les instruments. Le problème de la mesure et les deux premiers éléments de sa solution sont une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » : ils constituent un deuxième symptôme du caractère incomplet de la description quantique de la réalité.

Revenons maintenant au double rôle joué par la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure. D'une part, la relation de Heisenberg implique que la mesure de l'une des deux grandeurs dynamiques fondamentales modifie l'autre (lorsque la valeur minimale spécifiée par cette relation est atteinte). Il faut ici supposer que, lors d'un acte d'observation, un processus déterministe mais inconnu modifie en partie l'état d'une particule. Ce processus expliquerait en même temps pourquoi, d'autre part, on ne peut pas mesurer simultanément les deux grandeurs dynamiques fondamentales (à moins d'employer des instruments peu précis). Le double rôle joué par la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure serait un troisième symptôme du caractère incomplet de la description quantique de la réalité : il traduirait l'ignorance de ce processus déterministe.

L'échelle quantique de la réalité est à l'image de l'échelle classique, mais, contrairement à cette dernière, n'est connue que partiellement. Selon Einstein, l'effet de l'observateur en mécanique quantique ne correspond à aucune réalité mais n'est rien d'autre qu'un indicateur du caractère incomplet de la description quantique de la réalité.

### **7.5 Le rapport entre théorie et réalité**

Les ensembles de valeurs propres et d'amplitudes attribués aux grandeurs dynamiques non mesurées ne correspondent à aucun élément de la réalité : ils ne font qu'incarner l'état d'ignorance partielle de l'expérimentateur face à celles-ci. Les fonctions d'onde, de vitesse et de spin ne représentent pas la réalité : elles ne sont rien de plus que des abstractions mathématiques, que des outils de calcul servant à prédire les résultats de mesures, d'observations et d'expériences. Les états quantiques (superposés) attribués aux particules non observées n'ont pas de réalité : ils sont une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité », ils symbolisent le caractère incomplet de la description quantique des états des particules.

Seuls les ensembles réduits de valeurs propres et d'amplitudes, attribués aux grandeurs dynamiques mesurées, correspondent à des éléments de la réalité : ils constituent la connaissance limitée par la précision des instruments de ces derniers. Un état réduit selon les grandeurs dynamiques mesurées représente la connaissance, limitée à ces grandeurs dynamiques et par la précision des instruments, de l'état réel d'une particule, qui est unique (de manière exacte et non approximative) selon toutes les grandeurs dynamiques simultanément et en tout temps.

### **7.6 Une théorie à variables cachées**

Afin de donner une description complète de la réalité, afin que chaque élément de la réalité soit en tout temps représenté par un élément correspondant de la théorie, la théorie physique fondamentale qu'il faut chercher devra faire appel à de nouvelles variables, inexistantes dans le formalisme mathématique de la mécanique quantique. Or, ce dernier rend déjà compte de tous les résultats de mesures, d'observations et d'expériences. Ces nouvelles variables ne pourront pas être mises en correspondance directe avec des données, elles ne seront pas observables : elles sont dites « cachées ». La théorie physique fondamentale qu'il faut chercher est ainsi une « théorie à variables cachées ».

Cette théorie sera totalement déterministe, comme la physique classique. La théorie à variables cachées et la mécanique quantique seront reliées par des relations mathématiques de nature statistique.

### **7.7 Une interprétation d'ensemble**

L'interprétation statistique (ou d'ensemble) implique qu'un état superposé ne correspond pas, en réalité, à l'état d'une particule individuelle, mais à l'état collectif d'un ensemble composé d'un grand nombre de particules identiques soumises à des conditions

environnementales identiques. La mécanique quantique est une théorie déterministe et complète des ensembles de particules, mais aléatoire et incomplète des particules individuelles. La théorie quantique ne peut donner de l'état d'une particule individuelle qu'une description statistique fondée sur la description d'un ensemble de particules.

## Chapitre 8

### L'interprétation de Copenhague et l'interprétation existentielle

L'interprétation de Copenhague fut créée par Niels Bohr et Werner Heisenberg (le découvreur de la relation qui porte son nom) à Copenhague en 1927-1928. Des physiciens, principalement Bohr, continuèrent à la développer au cours des décennies qui suivirent. L'interprétation de Copenhague s'est rapidement imposée comme l'interprétation dominante de la mécanique quantique, ce qui lui vaut le titre d'interprétation orthodoxe ou standard, et le demeure en 2009.

Indiquons que l'interprétation de Copenhague, tout comme l'interprétation statistique, a été conçue bien avant la venue de la théorie de la décohérence en 1952 et dont le développement commence véritablement en 1981 ; forcément, elle ne l'intègre pas. L'interprétation de Copenhague repose sur deux fondements : le quantum d'action et le positivisme.

#### 8.1 Premier fondement : le quantum d'action

En physique, classique comme quantique, tout processus, incluant l'interaction entre un instrument et un objet, peut être représenté par un concept mathématique nommé « action ». En physique quantique, l'action varie de manière discontinue : elle est toujours égale à un multiple entier de la constante de Planck  $h$ . Elle peut être égale à 0,  $h$ ,  $2h$ ,  $3h$ , ... et à aucune autre valeur. La plus petite valeur non nulle que peut prendre l'action en mécanique quantique, soit une fois la constante de Planck, est nommée « quantum d'action ». En mécanique quantique, l'acte de mesure le moins perturbateur possible est représenté par une action égale à un quantum d'action ; en deçà, l'action est nulle, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'interaction entre l'instrument et l'objet, donc pas d'acte de mesure.

En physique quantique, à l'échelle des particules, d'une part, les résultats de mesures, d'observations et d'expériences sont de nature aléatoire. D'autre part, la constante de Planck ne peut pas être négligée et on doit considérer que même l'acte de mesure le moins perturbateur possible perturbe la particule observée et modifie son état de manière significative. L'expérimentateur tente toujours de perturber le moins possible l'objet qu'il observe : considérons que tout acte d'observation en mécanique quantique est représenté par une action égale à un quantum d'action. L'interprétation de Copenhague donne quatre significations au quantum d'action.

(1) Le problème de la mesure et les deux premiers éléments de sa solution (la règle de probabilité et le postulat de réduction) représentent « ce que la réalité est et fait ». Les états naturels des particules sont, de manière absolue, inaccessibles à l'observation : le fait même d'observer une particule modifie automatiquement son état. Sont accessibles à l'observation uniquement des états modifiés par l'acte même d'observation. En physique

quantique, les données ne nous renseignent pas sur les états naturels particules, mais sur les interactions entre particules et instruments.

(2) Le quantum d'action est un élément de la théorie qui est indivisible. Il est égal à une constante physique fondamentale, la constante de Planck. Il ne se calcule pas à partir de paramètres qui représenteraient la particule observée et l'instrument. Par conséquent, un acte de mesure représenté par un quantum d'action est, dans la réalité, un processus indivisible. On dit d'un tel processus qu'il est « élémentaire » : il s'agit du processus le plus simple qui soit, c'est-à-dire ne pouvant pas être analysé comme le résultat global de processus plus simples.

En physique quantique, une donnée ne représente pas une propriété appartenant à la particule par elle-même et que l'instrument aurait lu passivement : une donnée représente une propriété nouvelle, émergente, créée conjointement et de manière indissociable par la particule et l'instrument au moment de leur interaction, une propriété qui n'existait pas avant cette interaction et qui cesse d'exister dès que celle-ci se termine. Telle est la nature des grandeurs dynamiques en physique quantique. En physique quantique, tout résultat de mesure, d'observation et d'expérience représente une propriété qui appartient au dispositif expérimental dans sa globalité (particule et instrument inclus).

(3) L'échange qui a lieu, au moment de la mesure, entre l'instrument et la particule étant indivisible, il est impossible de le contrôler avec précision. Toute action entreprise dans ce but se superposerait à cet échange et empêcherait l'instrument de remplir sa fonction. Le hasard incarné dans la réduction non unitaire correspond à « ce que la réalité est et fait », il est inhérent à l'acte de la mesure.

(4) Intéressons-nous maintenant au double rôle joué par la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure. D'une part, elle interdit la mesure simultanée de la position et de la vitesse (à moins d'employer des instruments peu précis, ce qui n'est pas désirable). D'autre part, lorsqu'une seule des deux grandeurs dynamiques fondamentales est mesurée (et que la valeur minimale spécifiée par la relation de Heisenberg est atteinte), l'autre est modifiée. La relation de Heisenberg fait des deux grandeurs dynamiques fondamentales des entités incompatibles.

Ce double rôle est imputé au quantum d'action. L'échange entre une particule et un instrument est indivisible et impossible à contrôler avec précision. Les instruments conçus pour mesurer respectivement la position et la vitesse agiraient sur une même particule de manière antagoniste, le travail de l'un interférant avec le travail de l'autre. L'interprétation de Copenhague en fait des instruments incompatibles. D'une part, ils ne peuvent pas être utilisés simultanément (à moins d'être peu précis, de sorte que leurs effets perturbateurs mutuels soient inférieurs à leurs marges d'incertitude). D'autre part, si on les utilise successivement à l'intérieur d'un intervalle de temps si court que l'évolution de l'état de la particule puisse être négligée entre les deux mesures, la deuxième mesure modifie l'état de la particule d'une manière telle qu'elle invalide l'information acquise par la première mesure.

Selon l'interprétation de Copenhague, l'incompatibilité des deux grandeurs dynamiques fondamentales est la conséquence de l'incompatibilité des instruments. La relation de Heisenberg représente « ce que la réalité est et fait ».

Selon Bohr et Heisenberg, c'est le quantum d'action qui est la véritable nouveauté en physique quantique ; c'est son existence qui demande de nouvelles lois physiques.

## **8.2 Deuxième fondement : le positivisme**

L'interprétation de Copenhague se fonde ensuite sur un courant philosophique nommé le « positivisme ». Selon celui-ci, la science doit traiter exclusivement de ce qui est observable et doit se taire sur le non observable. Selon le positivisme, le but de la science se limite à décrire et à prédire les résultats de mesures, d'observations et d'expériences. La science ne doit pas chercher à expliquer les phénomènes par des causes (non observables), car elle risque alors de se référer à des entités qui n'existent pas et à chercher des solutions à des problèmes imaginaires. Tout énoncé portant sur des entités non observables est considéré non scientifique et vide de sens. Tout supposé élément de la réalité qu'il serait impossible d'observer de quelque manière que ce soit n'existe pas.

## **8.3 Les éléments de la réalité**

Les éléments de la réalité doivent être trouvés par un appel aux résultats de mesures, d'observations et d'expériences. En vertu du quantum d'action, les états naturels des particules sont, de manière absolue, inaccessibles à l'observation : le fait même d'observer une particule modifie automatiquement son état. Le positivisme mène alors à une conclusion radicale : les états naturels des particules n'existent pas ! En vertu du quantum d'action, seuls des états modifiés par l'acte même d'observation sont accessibles à l'observation. En vertu du positivisme, il faudra considérer que l'acte d'observation ne modifie pas l'état d'une particule : il le crée ! En vertu du quantum d'action et du positivisme, la réduction non unitaire désigne la transition du potentiel au réel. Le niveau ultime de la réalité, par lui-même, n'existe qu'à titre potentiel.

Ensemble, le quantum d'action et le positivisme nous forcent à conclure que les principes classiques du réalisme et de l'espace-temps ne s'appliquent pas à l'échelle quantique de la réalité : ce sont des principes fondamentalement inadéquats pour donner une signification à la mécanique quantique. À l'échelle quantique, il faut réviser radicalement notre conception de la réalité !

En physique quantique, l'expression « phénomène physique » doit être redéfinie pour désigner une particule en train d'interagir avec un ensemble d'instruments, dans un dispositif expérimental, et les propriétés qui sont créées par cette interaction. Les conditions d'observation font partie de manière inhérente de tout phénomène quantique pouvant être qualifié de réel : elles donnent réalité au phénomène et déterminent quelles sont les propriétés qu'il acquiert.

Une particule non observée n'a pas de réalité et ne possède aucune propriété ; elle est dématérialisée. Elle n'est pas présente dans l'espace-temps : elle ne possède ni position, ni vitesse, ni aucune autre grandeur dynamique externe.

Une particule n'est réelle, matérialisée, que lorsqu'elle est en train d'être observée, c'est-à-dire que lorsqu'elle est en train d'interagir avec un ensemble d'instruments, pas avant ni après. Elle n'acquiert alors de propriétés que celles qui sont en train d'être mesurées simultanément et aucune autre ; en vertu du quantum d'action, ces propriétés ne lui appartiennent pas en propre, mais appartiennent au dispositif expérimental dans sa globalité (chaque grandeur dynamique réelle appartient conjointement et de manière indissociable à la particule et à l'instrument qui est en train de la mesurer). Une particule ne se manifeste dans l'espace-temps que lorsqu'au moins une grandeur dynamique externe (position, vitesse, énergie, moment cinétique...) est en train d'être mesurée. Voilà quels sont les éléments de la réalité à l'échelle quantique. Les instruments conservent ensuite la trace de leur interaction avec la particule : ils ont enregistré des données (une tache est apparue sur un écran, une aiguille a changé d'orientation sur un cadran...).

#### **8.4 Le rapport entre théorie et réalité**

Les ensembles de valeurs propres et d'amplitudes attribués aux grandeurs dynamiques non mesurées ne correspondent à aucun élément de la réalité, mais ils ne sont pas non plus une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » : ils signifient que ces grandeurs dynamiques n'ont pas de réalité. La largeur (effective dans le cas d'une grandeur dynamique continue) de l'ensemble de valeurs propres attribué à une grandeur dynamique représente une incertitude (une indéfinition, un flou) qui est intrinsèque à celle-ci.

À des fins de clarté, dans ce texte, nous établirons la distinction suivante : nous utiliserons le terme « potentiel » pour désigner une propriété qui n'est pas observée et n'a pas de réalité et le terme « possible » pour désigner les différentes façons dont une grandeur dynamique peut être définie, au hasard, lorsqu'elle est mesurée et devient réelle. Nous dirons ainsi qu'une grandeur dynamique non mesurée n'existe qu'à titre potentiel et se présente sous la forme d'un ensemble de possibilités (l'ensemble de ses valeurs propres) ayant différentes probabilités de devenir réelles si une mesure est effectuée. L'expression « définition d'une grandeur dynamique » désigne la sélection de l'une des possibilités (de l'une des valeurs propres) qui est opérée par l'acte de la mesure, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument, et qui donne réalité cette possibilité, avec, dans le cas d'une grandeur dynamique continue, une incertitude résiduelle correspondant à la marge d'incertitude de l'instrument. La possibilité ainsi sélectionnée devient le résultat de la mesure, affiché par l'instrument.

L'expression « définition de la position d'une particule », une grandeur dynamique continue, désigne ainsi la sélection, à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument, du lieu effectif où une particule observée se matérialise (le lieu effectif où une tache apparaît sur un écran). L'expression « définition de la vitesse d'une particule », une autre grandeur dynamique

continue, désigne la sélection, toujours à l'intérieur de la marge d'incertitude de l'instrument, du mouvement effectif, en vitesse et en direction, avec lequel une particule observée se matérialise (l'orientation finale effective d'une aiguille sur un cadran). L'expression « définition du spin d'une particule », une grandeur dynamique cette fois-ci discrète, désigne la sélection du spin unique effectif avec lequel une particule observée se matérialise (à nouveau l'orientation finale effective d'une aiguille sur un cadran).

Les états quantiques (superposés) attribués aux particules non observées n'ont pas de réalité, mais ils ne sont pas non plus une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » : ils signifient que l'état d'une particule non observée est incertain (indéfini, flou). Nous dirons qu'un état superposé n'existe qu'à titre potentiel et qu'il se présente sous la forme d'un ensemble de possibilités (l'ensemble des états propres qu'il contient, selon toutes les grandeurs dynamiques) ayant différentes probabilités de devenir réelles si une observation est effectuée.

Une particule (assimilée à un objet ponctuel) non observée peut potentiellement se situer en n'importe quel point d'espace couvert par le paquet d'ondes qui la représente (de manière plus restrictive, par le volume effectif du paquet d'ondes, les probabilités de présence à l'extérieur de celui-ci étant négligeables), mais, dans la réalité, elle ne se situe nulle part dans l'espace. Elle peut potentiellement suivre n'importe quel mouvement (en vitesse et en direction) représenté dans le spectre de de Broglie qui lui est associé (de manière plus restrictive, dans la partie effective du spectre de de Broglie, les probabilités à l'extérieur de celui-ci étant négligeables), mais, dans la réalité, elle n'est ni en mouvement ni immobile. Elle peut potentiellement posséder n'importe quel spin que la théorie lui attribue, mais, dans la réalité, elle n'en possède aucun.

Les fonctions d'onde, de vitesse et de spin ne représentent pas la réalité : elles sont des abstractions mathématiques, des outils de calcul servant à prédire les résultats de mesures, d'observations et d'expériences.

Seuls les ensembles réduits de valeurs propres et d'amplitudes, attribués aux grandeurs dynamiques mesurées, correspondent à des éléments de la réalité. Seuls les états réduits selon les grandeurs dynamiques mesurées sont réels. Ces états sont classiques (uniques, parfaitement définis, certains) selon les grandeurs dynamiques discrètes, comme le spin, et approximativement classiques (approximativement uniques, définis avec une incertitude résiduelle correspondant à la marge d'incertitude de l'instrument) selon les grandeurs dynamiques continues, comme la position et la vitesse (cette incertitude résiduelle est un élément de la réalité). Ils demeurent quantiques (multiples, indéfinis, incertains) selon les grandeurs dynamiques qui ne sont pas mesurées.

### **8.5 Les limites de la causalité et du déterminisme**

En vertu du quantum d'action, l'interaction entre une particule et un instrument est un processus élémentaire qu'il est impossible de contrôler avec précision. Le hasard incarné

par la réduction non unitaire est inhérent à « ce que la réalité est et fait » : une grandeur dynamique mesurée est définie selon un hasard réel. Le principe du déterminisme ne s'applique pas à l'échelle quantique de la réalité.

Par ailleurs, en vertu du quantum d'action et du positivisme, la réduction non unitaire désigne la transition du potentiel au réel. Une grandeur dynamique non mesurée n'existe qu'à titre potentiel et se présente sous la forme d'un ensemble de possibilités ayant différentes probabilités de devenir réelles. D'une part, l'acte de la mesure est une cause dont l'effet est de donner réalité à la grandeur dynamique mesurée. D'autre part, cette grandeur dynamique est alors définie selon un hasard réel. Aucune cause ne détermine laquelle des possibilités (des valeurs propres) présentées par la grandeur dynamique est sélectionnée et devient réelle par l'acte de la mesure. Une grandeur dynamique qui est mesurée et devient réelle émerge d'un niveau de réalité qui n'existe qu'à titre potentiel. Au niveau ultime de la réalité, il existe des effets qui n'ont pas de cause : le principe de causalité cesse de s'appliquer.

Avec les expériences de physique quantique, les humains ont atteint le niveau ultime de la réalité, celui des processus élémentaires (indivisibles), et celui-ci marque les limites de la causalité et du déterminisme. À l'échelle quantique de la réalité, il faut renoncer définitivement à ces idéaux classiques : ce sont des principes fondamentalement inadéquats pour donner une signification à la mécanique quantique. L'échelle quantique de la réalité est intrinsèquement acausale et aléatoire !

## **8.6 Le principe de complémentarité**

Par quoi faut-il remplacer, à l'échelle quantique de la réalité, les principes classiques du réalisme, de l'espace-temps, de la causalité et du déterminisme ? Bohr et Heisenberg répondent : par un nouveau principe, quantique, celui de complémentarité. Ce principe comprend trois applications, dont l'une constitue la définition que Bohr et Heisenberg donnent au principe quantique de la dualité onde-corpuscule. Le principe de complémentarité est le cœur de l'interprétation de Copenhague.

### (A) Les concepts classiques

L'échelle classique de la réalité est décrite qualitativement par quatre groupes de concepts : (1) l'espace-temps ; (2) les grandeurs dynamiques externes (position, vitesse, énergie, moment cinétique...), qui se rapportent à la situation d'un objet dans l'espace-temps ; (3) les concepts d'onde et de corps (incluant celui de corpuscule, de « petit corps », de « petite bille solide »), qui désignent l'aspect sous lequel un objet se manifeste dans l'espace-temps ; (4) la causalité, le concept selon lequel tout événement est l'effet d'une cause (et qui est lié au principe du déterminisme).

L'usage des concepts classiques en physique quantique sera réglementé par le principe de complémentarité. Ceux-ci se répartiront en trois paires de concepts mutuellement exclusifs mais conjointement nécessaires, dits « complémentaires » l'un de l'autre : (a) la paire causalité et espace-temps ; (b) la paire position et vitesse ; (c) la paire onde et

corpuscule. L'exclusion mutuelle désignera l'impossibilité d'employer simultanément deux concepts classiques complémentaires dans la description d'une même situation expérimentale ; la nécessité conjointe signifiera que ceux-ci sont aussi nécessaires l'un que l'autre dans la description de toutes les situations expérimentales possibles.

### (B) Les trois applications du principe de complémentarité

#### *(1) L'opposition entre description causale et description dans l'espace-temps*

Le concept classique de causalité s'applique entre le moment où une expérience est lancée et le moment de l'observation. La particule non observée suit alors une évolution unitaire (régie par l'équation de Schrödinger), donc déterministe, à l'intérieur du dispositif expérimental, qui constitue son environnement. Le concept de causalité se rapporte cependant ici à des états qui n'ont pas de réalité. Dans une telle situation, le concept classique d'espace-temps ne s'applique pas car une particule non observée n'est pas présente dans celui-ci.

C'est uniquement lorsqu'une particule est en train d'être observée (plus précisément, lorsqu'au moins une grandeur dynamique externe est en train d'être mesurée : position, vitesse, énergie, moment cinétique...) qu'elle se manifeste dans l'espace-temps. Le concept classique d'espace-temps s'applique alors. Dans une telle situation, le concept classique de causalité ne s'applique pas. L'évolution d'une particule au moment de l'acte d'observation est une réduction non unitaire (régie par la règle de probabilité de Born), donc aléatoire. Aucune cause n'est à l'œuvre pour définir les grandeurs dynamiques qui sont mesurées, pour déterminer dans lequel des états réduits possibles la particule apparaît dans l'espace-temps. La particule qui se matérialise émerge d'un niveau de réalité qui n'existe qu'à titre potentiel.

#### *(2) Le rapport entre les deux grandeurs dynamiques externes fondamentales*

En vertu du double rôle joué par la relation de Heisenberg dans le problème de la mesure et du quantum d'action, les instruments conçus pour mesurer les deux grandeurs dynamiques fondamentales sont incompatibles, avec la conséquence que les deux grandeurs dynamiques fondamentales sont elles-mêmes incompatibles.

D'une part, ces instruments ne peuvent pas être utilisés simultanément (à moins d'être peu précis). Par conséquent, les deux grandeurs dynamiques fondamentales (en tant que propriétés du dispositif expérimental dans sa globalité) ne peuvent pas devenir réelles simultanément au cours d'un même acte d'observation (à moins d'être chacune entachée d'une grande incertitude résiduelle). Seule celle qui est mesurée devient réelle, avec une incertitude résiduelle correspondant à la marge d'incertitude de l'instrument, à l'exclusion de l'autre. Si aucune n'est mesurée, aucune ne devient réelle.

D'autre part, si on utilise les instruments conçus pour mesurer les deux grandeurs dynamiques fondamentales successivement à l'intérieur d'un intervalle de temps si court que l'évolution de l'état de la particule puisse être négligée entre les deux mesures, la

deuxième mesure modifie l'état de la particule d'une manière telle qu'elle invalide l'information acquise par la première mesure. La deuxième mesure a pour conséquence de retirer à la première grandeur dynamique mesurée la réalité qu'elle avait acquise. Celle-ci retourne à un niveau d'existence potentielle.

*(3) La dualité onde-corpuscule (définie à la manière de Bohr et Heisenberg)*

Lorsqu'une particule est observée (et qu'au moins une grandeur dynamique externe est mesurée), elle se manifeste dans l'espace-temps soit sous l'aspect d'une onde, soit sous celui d'un corpuscule, selon les conditions de son observation, mais jamais sous ces deux aspects simultanément. C'est l'acte d'observation qui donne réalité soit à l'aspect d'onde, soit à celui de corpuscule. L'exclusion mutuelle des concepts d'onde et de corpuscule est attribuée au fait que les différentes configurations possibles d'un dispositif expérimental donné, qui amènent une particule à se manifester sous un aspect ou l'autre, sont incompatibles. Ces configurations ne peuvent pas être mises en fonction simultanément. Pour plus de détails sur ce sujet, on peut lire, au complet, les parties 5 (*L'expérience des fentes de Young*) et 6 (*Le postulat de réduction du paquet d'ondes*) du compte-rendu de la conférence du 13 février 2007.

(C) La définition des phénomènes quantiques

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'expression « phénomène quantique » désigne une particule en train d'interagir avec un ensemble d'instruments, dans un dispositif expérimental, et les propriétés qui sont créées par cette interaction. Les grandeurs dynamiques sont alors définies de manière acausale et aléatoire. Avec le principe de complémentarité et ses notions d'exclusion mutuelle et de nécessité conjointe, nous apportons une précision supplémentaire : le phénomène quantique n'est pas défini par ce qui devient effectivement réel au cours d'un acte d'observation donné, mais par l'ensemble de tout ce qui *peut* devenir réel au cours de tous les actes d'observation possibles pouvant être réalisés dans un dispositif expérimental donné et sur un type donné de particule, donc par l'ensemble de toutes les propriétés potentielles.

Plus précisément, un phénomène quantique est défini par la combinaison (1) de l'ensemble de toutes les grandeurs constantes (telles la masse et la charge électrique), toujours réelles et définies, (2) de l'ensemble de toutes les grandeurs dynamiques externes (tels la position, la vitesse, l'énergie, le moment cinétique, etc.), réelles et définies uniquement lorsque mesurées, (3) de la grandeur dynamique interne de spin, réelle et définie uniquement lorsque mesurée, et (4) de l'ensemble des aspects onde et corpuscule, réels uniquement lorsque observés.

En vertu de la notion d'exclusion mutuelle, il est impossible de donner réalité simultanément à toutes les propriétés potentielles d'un phénomène quantique. Ce qui devient effectivement réel lors d'un acte d'observation ne peut être que certaines propriétés du phénomène à l'exclusion de leurs propriétés complémentaires : position OU vitesse (et/ou énergie et/ou moment cinétique et/ou spin et/ou etc.) ; onde OU corpuscule. La notion d'exclusion mutuelle renvoie à incompatibilité des instruments et à celle des

différentes configurations possibles d'un même dispositif expérimental, les uns et les autres donnant réalité aux différentes propriétés potentielles d'un phénomène quantique (les grandeurs dynamiques étant définies de manière acausale et aléatoire). La notion de nécessité conjointe renvoie à l'idée que toutes ces propriétés potentielles appartiennent à un même phénomène quantique.

#### (D) La relativité de la réalité à l'échelle quantique

Bohr dira à Einstein que la grande leçon à tirer du quantum d'action et du principe de complémentarité se compare à celle tirée des théories de la relativité, restreinte et générale, dont ce dernier est le père fondateur.

D'une part, les théories de la relativité nous ont enseigné que l'espace et le temps, considérés séparément, ne sont pas universels (ou absolus), mais relatifs à l'observateur. Des observateurs animés d'un mouvement l'un par rapport à l'autre perçoivent l'espace et le temps différemment, bien que l'espace et le temps soient des éléments d'une seule et même réalité.

Selon Bohr, la notion d'exclusion mutuelle nous enseigne, de manière analogue, que les propriétés d'un phénomène quantique qui deviennent effectivement réelles au cours d'un acte d'observation ne sont pas universelles (ou absolues), mais relatives à l'expérimentateur. Il est impossible, pour des raisons d'incompatibilité, de mettre en fonction simultanément tous les instruments possibles (en conséquence du quantum d'action) et d'utiliser simultanément toutes les configurations possibles d'un même dispositif expérimental. Pour ces raisons d'incompatibilité, il est impossible de donner réalité simultanément à toutes les propriétés potentielles d'un phénomène quantique donné. Des expérimentateurs travaillant avec des dispositifs expérimentaux identiques et observant des particules identiques, mais utilisant des instruments différents et/ou mettant en fonction des configurations différentes, donnent réalité à des propriétés différentes de phénomènes quantiques identiques (les grandeurs dynamiques étant définies de manière acausale et aléatoire).

D'autre part, les théories de la relativité nous ont aussi enseigné que l'espace-temps, considéré comme un continuum indissociable, est universel (absolu) : il est conçu de manière identique par tous les observateurs, indépendamment de leur état de mouvement. Mais l'espace-temps ne peut pas être perçu (observé).

Selon Bohr, la notion de nécessité conjointe nous enseigne, de manière analogue, qu'un phénomène quantique, considéré comme l'ensemble de toutes les propriétés potentielles, est universel (absolu) : il est conçu de manière identique par tous les expérimentateurs, indépendamment des instruments que ceux-ci utilisent et de la configuration de leur dispositif expérimental qu'ils mettent en fonction. Mais un phénomène quantique ne peut pas devenir réel dans sa totalité au cours d'un seul acte d'observation.

La grande leçon à tirer du quantum d'action et du principe de complémentarité est la relativité de la réalité à l'échelle quantique. Telle est la signification ultime que Bohr donne à l'effet de l'observateur en mécanique quantique.

### **8.7 Le principe d'incertitude de Heisenberg**

La relation de Heisenberg fait partie du formalisme mathématique de la mécanique quantique ; elle relève de la science. Bohr et Heisenberg lui donnent une signification philosophique, nommée « principe d'incertitude de Heisenberg », que l'on peut énoncer comme suit :

L'état d'une particule est en tout temps porteur d'une incertitude intrinsèque. Lorsqu'une particule n'est pas observée, son état est totalement incertain. Lorsqu'une particule est observée, les deux grandeurs dynamiques fondamentales, la position et la vitesse, ne peuvent pas être définies simultanément avec une précision arbitraire. La limite de précision est donnée par la relation de Heisenberg. Lorsque cette limite est atteinte, plus celle des deux grandeurs dynamiques fondamentales qui est mesurée (et qui devient réelle) sera définie avec une grande précision (son incertitude résiduelle sera d'autant plus petite que l'instrument employé sera précis) et plus l'autre (qui n'a pas alors de réalité) sera incertaine. Les deux grandeurs dynamiques fondamentales peuvent être mesurées et devenir réelles simultanément, mais seulement à la condition d'employer des instruments peu précis, avec l'implication qu'elles sont alors chacune porteuse d'une grande incertitude résiduelle.

Le principe d'incertitude de Heisenberg peut être considéré comme un énoncé équivalent à la deuxième application du principe de complémentarité, le *rapport entre les deux grandeurs dynamiques externes fondamentales*.

### **8.8 Une description complète**

D'une part, si la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être connues simultanément (ne peuvent pas être représentées simultanément par des ensembles réduits de valeurs propres et d'amplitudes, au-delà de la limite imposée par la relation de Heisenberg), c'est parce qu'elles ne peuvent pas être simultanément des éléments de la réalité (à moins d'être chacune porteuse d'une grande incertitude résiduelle). Cela est la conséquence de l'incompatibilité des instruments conçus pour les mesurer.

D'autre part, si la théorie quantique est incapable, par un calcul seul, sans qu'aucune mesure ne soit effectuée, de procurer la connaissance d'une grandeur dynamique (de lui attribuer un ensemble réduit de valeurs propres et d'amplitudes), c'est parce qu'une grandeur dynamique non mesurée n'est pas définie et n'a pas de réalité. C'est l'acte de la mesure qui donne réalité à une grandeur dynamique et celle-ci est alors définie de manière acausale et aléatoire. C'est pourquoi seule une mesure peut procurer la connaissance d'une grandeur dynamique.

Ainsi, chaque élément qui existe dans la réalité est toujours représenté par un élément correspondant de la théorie (par un ensemble réduit de valeurs propres et d'amplitudes). La description quantique de l'état (réel) d'une particule est complète. De plus, le phénomène quantique n'est pas défini par les propriétés qui deviennent effectivement réelles au cours d'un acte d'observation donné, mais par l'ensemble de toutes les propriétés potentielles. Or, chaque propriété potentielle est toujours représentée par un élément correspondant de la théorie (par un ensemble *non* réduit de valeurs propres et d'amplitudes). La description quantique de la réalité est complète, autant au niveau de ce qui existe à titre potentiel qu'au niveau de ce qui est effectivement réel. La mécanique quantique est une théorie physique fondamentale ; d'ailleurs, elle rend compte de tous les résultats de mesures, d'observations et d'expériences.

### **8.9 L'acte d'observation**

Dans le cadre de l'interprétation de Copenhague, le problème de la mesure peut être reformulé ainsi : comment un état qui n'existe qu'à titre potentiel et qui se présente sous la forme d'un ensemble de possibilités peut-il être transformé, par un acte d'observation, en un état réel et défini (parfaitement ou avec incertitude résiduelle, selon le cas), au hasard, selon les grandeurs dynamiques mesurées ?

#### (A) La frontière quantique-classique

Rappelons que l'interprétation de Copenhague a été créée bien avant la venue de la théorie de la décohérence. Selon Bohr et Heisenberg, la physique quantique n'est pas universelle et la physique classique n'en est pas un cas particulier ou limite. La physique quantique et la physique classique sont distinctes et indépendantes ; une connaissance unifiée de la réalité n'est pas possible. En 1927-28, on savait par ailleurs que les physiques quantique et classique sont reliées l'une à l'autre par le principe de correspondance.

Ainsi, la réalité elle-même doit-elle être séparée en deux échelles distinctes et indépendantes, les échelles quantique et classique. Ces deux échelles sont radicalement différentes l'une de l'autre. La réalité est néanmoins globalement cohérente, tel que l'exprime, dans la théorie, le principe de correspondance.

Les échelles quantique et classique de la réalité sont séparées par une frontière qui est floue et, à certaines conditions, mobile. Cette frontière constitue l'interface entre le niveau ultime de la réalité, qui n'existe qu'à titre potentiel, et la réalité proprement dite, entre les possibilités quantiques multiples et la réalité classique unique.

La mobilité de la frontière quantique-classique est régie par le principe de correspondance. Celui-ci autorise qu'un corps soit décrit indifféremment par la théorie quantique ou classique car il garantit que les deux descriptions sont équivalentes, mais impose qu'une particule soit décrite exclusivement par la théorie quantique. La mobilité de la frontière quantique-classique est donc telle que les particules doivent toujours être

placées du côté quantique de celle-ci, mais que les corps peuvent être placés arbitrairement du côté classique ou quantique.

### (B) Une discrimination nécessaire entre instruments et objets observés

Dans une expérience de physique quantique, le dispositif expérimental contient nécessairement des parties quantiques et classiques. Tout d'abord, par définition de ce qu'est une expérience de physique quantique, un dispositif expérimental contient obligatoirement des particules qui seront soumises à l'observation. Ensuite, il doit aussi contenir des pièces situées à l'échelle humaine, donc classique, afin que les expérimentateurs puissent manipuler ces pièces et lire les résultats indiqués par les instruments.

Dans une expérience de physique quantique, la frontière quantique-classique doit être tracée entre les instruments et les objets observés. Les instruments, qui fournissent les données, seront obligatoirement des objets classiques et les objets observés seront tous traités comme des objets quantiques. Ces derniers incluent nécessairement toutes les particules sous observation, mais, en vertu de la mobilité de la frontière quantique-classique, peuvent aussi inclure tout corps choisi arbitrairement par l'expérimentateur. La mobilité de la frontière quantique-classique doit être telle qu'il soit possible de considérer l'instrument ultime, le cerveau humain, comme un objet observé quantique, à la condition de détenir un instrument classique adéquat pour l'observer. Enfin, parce que les instruments observeront des phénomènes qui se produiront à une échelle de réalité considérablement plus petite que la leur, ils devront être munis d'amplificateurs.

### (C) L'acte d'observation

Le traçage de la frontière quantique-classique entre les instruments et les objets observés est l'élément clé de la description de l'interaction entre un ensemble d'instruments et une particule.

#### *(1) Comment un acte d'observation donne-t-il réalité à une particule ?*

L'acte de la mesure implique un changement de l'état d'un instrument : une tache est apparue sur un écran, une aiguille a changé d'orientation sur un cadran, etc. Le résultat de la mesure, enregistré par l'instrument, est d'abord et avant tout l'état final de celui-ci. Dans une expérience de physique quantique, en vertu du quantum d'action et du positivisme, c'est uniquement parce qu'un objet soumis aux principes du réalisme et de l'espace-temps, l'instrument *classique*, a subi un changement d'état que l'on conclue que quelque chose a interagi avec cet objet, donc s'est manifesté dans la réalité. En vertu du quantum d'action et du positivisme, c'est uniquement l'enregistrement d'une donnée par un instrument classique, donc la production de quelque chose d'observable, qui atteste de la réalité d'une particule quantique. En vertu du quantum d'action et du positivisme, l'échange entre l'instrument et la particule est la cause qui donne réalité à la particule et qui détermine quelle est la grandeur dynamique qui devient alors réelle ; cette grandeur dynamique est définie de manière acausale et aléatoire. La particule quantique qui se

matérialise par l'action d'instruments classiques émerge d'un niveau de réalité qui n'existe qu'à titre potentiel et y retourne dès que l'interaction se termine.

La présence d'un objet classique, soumis aux principes du réalisme et de l'espace-temps, est un préalable indispensable pour qu'une particule quantique, soumise au principe de complémentarité, devienne réelle et acquiert des propriétés. L'échelle classique de la réalité est autonome, elle se suffit à elle-même, elle constitue la réalité proprement dite. Elle est intrinsèquement unique, certaine (définie). Mais l'échelle quantique de la réalité, le niveau ultime de la réalité, n'existe qu'à titre potentiel. L'échelle quantique est intrinsèquement multiple, incertaine (indéfinie, floue). Il n'y a de phénomène quantique réel que lorsqu'il y a interaction entre les deux échelles de la réalité.

*(2) Comment un état quantique (multiple) est-il transformé, par un acte d'observation, en un état classique (unique) ou approximativement classique (selon les grandeurs dynamiques mesurées) ?*

Parce qu'un instrument et une particule ont interagi, parce qu'il y a eu un échange entre eux, leurs états finaux respectifs sont corrélés. Ainsi, la donnée enregistrée par l'instrument, soit l'état final de l'instrument, constitue-t-elle une information sur l'état final de la particule.

Or, un instrument se situe impérativement du côté classique de la frontière quantique-classique : son état est toujours unique (classique !). Un écran qui se fait frapper par une seule particule ne peut enregistrer qu'une seule tache d'impact, jamais plusieurs simultanément ; une aiguille sur un cadran ne peut pointer que dans une seule direction à la fois, jamais dans plusieurs simultanément. Puisqu'au moment de l'acte d'observation, les états de la particule et de l'instrument deviennent corrélés et puisque l'instrument est un objet qui existe, possède ses propriétés et évolue par lui-même mais non la particule, l'état de la particule doit devenir lui aussi unique (classique)... en principe. En pratique, l'existence d'une marge d'incertitude inhérente à tout instrument a pour conséquence que l'état de la particule devient unique seulement selon une grandeur dynamique discrète ; il devient approximativement unique selon une grandeur dynamique continue.

Lorsque la particule et l'instrument se rencontrent, la particule présente, pour la grandeur dynamique qui est en train d'être mesurée, un ensemble de possibilités. La nature classique de l'instrument impose que celui-ci ne puisse en enregistrer qu'une seule, à l'intérieur de sa marge d'incertitude. En vertu du quantum d'action, l'échange qui a lieu entre l'instrument et la particule est un processus élémentaire (indivisible) et impossible à contrôler avec précision. Cet échange a pour conséquence qu'une seule des possibilités présentées par la particule est sélectionnée et devient le résultat indiqué par l'instrument. Cette sélection est opérée conjointement et de manière indissociable par la particule et l'instrument, et cela, de manière acausale et aléatoire. Une grandeur dynamique qui devient réelle en conséquence d'être mesurée émerge d'un niveau de réalité qui n'existe qu'à titre potentiel et y retourne dès que l'acte de la mesure se termine. En pratique, dans le cas d'une grandeur dynamique continue, l'existence d'une marge d'incertitude

inhérente à tout instrument implique que c'est un sous-continuum de possibilités, dont l'étendue correspond à cette marge, qui est sélectionné de manière acausale et aléatoire.

La frontière quantique-classique agit comme un filtre entre le possible quantique et le réel classique : d'un ensemble de possibilités quantiques, elle n'en laisse qu'une seule (ou qu'un sous-continuum) devenir une réalité classique (ou approximativement classique), au hasard.

### **8.10 Deux variantes principales**

Bohr et Heisenberg étaient d'accord sur le principal, mais entretenaient un désaccord majeur. Bohr était un positiviste « radical » et soutenait qu'il n'existe de phénomènes quantiques réels que ceux produits dans un dispositif expérimental. Heisenberg était un positiviste « modéré » et admettait l'existence de phénomènes quantiques naturels, donc non observés, telles les réactions de fusion nucléaire au cœur du Soleil. L'interprétation de Copenhague se présente ainsi en deux variantes principales, la variante radicale de Bohr et la variante modérée de Heisenberg.

Pour Heisenberg, ce n'est pas la présence, spécifiquement, d'un instrument classique qui est un préalable indispensable pour qu'une particule quantique devienne réelle, mais celle, en toute généralité, d'un environnement classique (macroscopique, composé d'un très grand nombre de particules), indépendamment qu'il soit naturel ou artificiel. Un dispositif expérimental est un type particulier d'environnement classique ; l'acte d'observation est un cas particulier d'interaction avec un environnement classique. La frontière quantique-classique est alors tracée entre la particule et l'environnement. L'environnement « enregistre » le résultat de son interaction avec la particule par le changement d'état qu'il subit.

Pour Heisenberg, ce ne sont pas, spécifiquement, les conditions d'observation qui font partie de manière inhérente de tout phénomène quantique pouvant être qualifié de réel : c'est, en toute généralité, le « reste de l'Univers » ! Heisenberg remplace la distinction entre « particule non observée » et « particule observée » par la distinction entre « particule isolée » et « particule en interaction avec son environnement (par extension, avec le reste de l'Univers) ». Le principe de complémentarité doit se généraliser aux interactions naturelles entre une particule et son environnement ; la relativité de la réalité à l'échelle quantique doit être comprise comme la signification ultime, en toute généralité, de l'effet de l'environnement (du reste de l'Univers) en mécanique quantique, l'effet de l'observateur en constituant un cas particulier.

On notera qu'aujourd'hui, la théorie de la décohérence (qui relève de la science), parce qu'elle traite autant des phénomènes quantiques naturels qu'artificiels, réfute la variante radicale de Bohr. On notera par ailleurs que la variante modérée de Heisenberg est compatible avec la théorie de la décohérence, avec laquelle elle présente même plusieurs affinités.

### 8.11 L'interprétation existentielle de la mécanique quantique

Zurek, l'un des principaux chercheurs travaillant sur la théorie de la décohérence, soutient une interprétation dite « existentielle » de la mécanique quantique, en développement depuis 1991. En gros, il s'agit de la variante modérée de Heisenberg « revue et corrigée » à la lumière de la théorie de la décohérence.

La physique quantique est considérée universelle et la physique classique un cas particulier ou limite, de celle-ci. L'échelle quantique de la réalité correspond à la réalité dans sa totalité et l'échelle classique en est un sous-domaine. La théorie de la décohérence est interprétée comme représentant « ce que la réalité est et fait ». La supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées désignent la transition du potentiel au réel. La supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées se substituent à la frontière quantique-classique et constituent l'interface entre le niveau ultime de la réalité, qui n'existe qu'à titre potentiel, et la réalité proprement dite, entre les possibilités quantiques multiples et la réalité classique unique. Selon l'interprétation existentielle, tout comme selon la théorie de la décohérence, l'effet de l'environnement, dans le cas général, et l'effet de l'observateur, un cas particulier, ne sont rien d'autre que la supersélection induite par l'environnement et la décohérence selon les grandeurs dynamiques sélectionnées.

### 8.12 Conclusion

La grande popularité dont a toujours joui l'interprétation de Copenhague, dès les premières années de la mécanique quantique et toujours en 2009, a entraîné une très fâcheuse confusion entre cette interprétation, qui relève de la philosophie, et la mécanique quantique elle-même, qui relève de la science, comme si toutes deux étaient une seule et même chose. Cette confusion se retrouve partout : chez les philosophes, les gourous du Nouvel-Âge, les journalistes scientifiques et même chez les physiciens. Une grande partie des discours tenus, en principe, sur la mécanique quantique traitent, en pratique, d'abord et avant tout de l'interprétation de Copenhague (voire des interprétations extravagantes qui en dérivent).

L'interprétation de Copenhague n'a par ailleurs jamais fait consensus. Dès sa création, des physiciens l'ont contesté, notamment Albert Einstein, qui lui opposait l'interprétation statistique (ou d'ensemble), et Erwin Schrödinger. Ces deux physiciens refusaient notamment de renoncer au réalisme à l'échelle quantique de la réalité. Einstein demanda à Bohr, en boutade : « Croyez-vous vraiment que la Lune n'est pas là si vous n'êtes pas en train de la regarder ? » Einstein qualifia Bohr de « mystique positiviste ». Schrödinger, quant à lui, jugeait que le terme « complémentarité » est un « mot-valise » qui, à l'instar d'une valise à deux compartiments capable de transporter deux objets différents à la fois, recouvre des paires de situations expérimentales fondamentalement différentes. Rappelons enfin que l'un des deux fondements de l'interprétation de Copenhague est le courant philosophique du positivisme : quiconque se montre sceptique devant le

positivisme se trouve, du coup, à se montrer sceptique devant l'interprétation de Copenhague – et, par extension, devant l'interprétation existentielle.

Les trois prochaines interprétations, les interprétations paradoxaliste (chapitre 9), subjectiviste (chapitre 10) et de l'influence de la conscience (chapitre 12), sont des détournements de l'interprétation de Copenhague vers l'irrationnel et même le surnaturel. Les chapitres 9 à 14 contiennent des précisions supplémentaires importantes sur l'interprétation de Copenhague.

## Chapitre 9

### L'interprétation paradoxaliste

#### 9.1 Le paradoxe logé au coeur de la réalité

Selon la notion de nécessité conjointe du principe de complémentarité, le phénomène quantique est défini par l'ensemble de toutes les propriétés potentielles. Or, selon la notion d'exclusion mutuelle, il existe des paires de propriétés qui ne peuvent pas devenir réelles simultanément, la réalité de l'une excluant celle de l'autre : ce sont les grandeurs dynamiques position et vitesse et les aspects onde et corpuscule.

Un phénomène quantique se trouverait ainsi à être défini par la synthèse de propriétés incompatibles. Un phénomène quantique serait, de manière inhérente, porteur de contradictions fondamentales. La grande leçon à tirer du quantum d'action et du principe de complémentarité serait le caractère intrinsèquement paradoxal de l'échelle quantique, du niveau ultime de la réalité. L'étude des phénomènes quantiques marquerait les limites de la logique dans la connaissance que les humains peuvent avoir de la réalité, du moins de la logique classique.

#### Deux arguments contre l'interprétation paradoxaliste

(1) Un argument philosophique. Le sens véritable du quantum d'action et du principe de complémentarité n'est pas le paradoxe logé au cœur de la réalité, mais la relativité de la réalité à l'échelle quantique. Le principe de complémentarité implique que ce qui est effectivement réel est parfaitement cohérent.

(2) Un argument scientifique. Rappelons que le principe de complémentarité est issu de l'interprétation de Copenhague, qui relève de la philosophie, et non de la mécanique quantique, qui relève de la science. Quant à la science, absolument rien dans le formalisme mathématique de la mécanique quantique (que l'on tienne compte ou non de la théorie de la décohérence, venue bien après l'interprétation de Copenhague) n'implique un caractère paradoxal aux phénomènes quantiques : la science est totalement cohérente, dépourvue de contradictions.

#### 9.2 Conclusion

L'interprétation paradoxaliste constitue une interprétation de l'interprétation de Copenhague et non une interprétation directe de la mécanique quantique. Il s'agit d'un second niveau d'interprétation philosophique, bien éloigné de la science !

Les tenants de l'interprétation paradoxaliste considèrent que celle-ci est impliquée par l'interprétation de Copenhague. Or, l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie) est presque systématiquement confondue avec la mécanique quantique (qui relève de la science). Les tenants de l'interprétation paradoxaliste soutiennent ainsi que

c'est la mécanique quantique elle-même (la science) qui nous révèle une réalité fondamentalement paradoxale.

L'interprétation paradoxaliste est irrationnelle car en contradiction avec la physique (la science). Elle est aussi en contradiction avec l'interprétation (philosophique) de Copenhague, dont elle dérive pourtant. Selon la physique et selon l'interprétation de Copenhague, la réalité est cohérente.

## Chapitre 10

### L'interprétation subjectiviste

À la section 6.2, nous avons présenté les principes du réalisme et d'objectivité, qui se situent au cœur de la physique classique. Ne pourrait-on pas soutenir que les principes du réalisme et d'objectivité constituent deux formulations différentes d'une seule et même idée ? Ainsi, le renoncement au réalisme à l'échelle quantique de la réalité, amené par l'interprétation de Copenhague, signifierait le renoncement au caractère objectif de celle-ci et l'affirmation de son caractère subjectif : l'échelle quantique dépendrait de l'esprit ! Un phénomène quantique ne serait, en dernière analyse, rien d'autre que la matérialisation des choix et/ou des perceptions de l'expérimentateur, celui-ci ayant conçu l'expérience, l'ayant mis en marche et prenant conscience des résultats indiqués par les instruments. La grande leçon à tirer du quantum d'action, du principe de complémentarité et de la description de l'acte d'observation donnée par l'interprétation de Copenhague serait le caractère subjectif de l'échelle quantique de la réalité. Telle serait la signification ultime de l'effet de l'observateur en mécanique quantique. Les phénomènes quantiques marqueraient les limites de l'objectivité, de l'indépendance des phénomènes par rapport à l'esprit. Il n'existerait pas de réalité ultime objective : à son niveau le plus fondamental, la réalité serait une création de l'esprit.

Nous présentons dans ce chapitre deux variantes de l'interprétation subjectiviste, que nous nommerons (1) « la matérialisation des choix de l'expérimentateur » (elle se fonde sur le quantum d'action et le principe de complémentarité) et (2) « la matérialisation des perceptions de l'expérimentateur » (elle se fonde sur la description de l'acte d'observation donnée par l'interprétation de Copenhague).

#### 10.1 La matérialisation des choix de l'expérimentateur

Selon la variante radicale de Bohr, en choisissant arbitrairement le moment, durant le déroulement de l'expérience, où l'acte d'observation (l'interaction entre la particule et un ensemble d'instruments) a lieu, l'expérimentateur décide du moment où le phénomène quantique devient réel (voir la 1<sup>re</sup> application du principe de complémentarité). L'existence d'instruments incompatibles force l'expérimentateur à faire des choix. En choisissant arbitrairement les instruments utilisés, l'expérimentateur décide des grandeurs dynamiques que le phénomène quantique acquiert : position OU vitesse et/ou énergie et/ou moment cinétique et/ou spin et/ou etc. (voir la 2<sup>e</sup> application du principe de complémentarité). Enfin, l'existence de configurations incompatibles dans un dispositif expérimental donné force également l'expérimentateur à faire des choix. En choisissant arbitrairement la configuration du dispositif expérimental, l'expérimentateur décide de l'aspect sous lequel le phénomène quantique se manifeste dans l'espace-temps : onde OU corpuscule (voir la 3<sup>e</sup> application du principe de complémentarité).

Selon la première variante subjectiviste, le phénomène quantique n'est rien d'autre que la matérialisation des choix arbitraires que l'expérimentateur est forcé de faire pour des

raisons d'incompatibilité entre différentes procédures expérimentales. L'expérimentateur est contraint à créer et à façonner le phénomène quantique selon sa volonté.

Or, selon la variante radicale de Bohr, la grande leçon à tirer du quantum d'action et du principe de complémentarité n'est pas le caractère subjectif de la réalité à l'échelle quantique, mais son caractère relatif. Telle est la signification ultime de l'effet de l'observateur en mécanique quantique. Comment l'idée d'une réalité relative à l'échelle quantique est-elle devenue l'idée d'une réalité subjective à l'échelle quantique ? La réponse est simple : la première variante subjectiviste omet implicitement la notion de nécessité conjointe du principe de complémentarité pour ne retenir que celle d'exclusion mutuelle.

Ainsi, d'après la première variante subjectiviste, le phénomène quantique est défini par ce qui devient effectivement réel au cours d'un acte d'observation. Les propriétés associées à un phénomène quantique sont uniquement celles qu'il acquiert effectivement en devenant réel. Or, en vertu de la notion d'exclusion mutuelle, il existe des paires de propriétés qui ne peuvent pas devenir réelles simultanément, la réalité de l'une excluant celle de l'autre : ce sont les grandeurs dynamiques position et vitesse et les aspects onde et corpuscule

En vertu de la notion d'exclusion mutuelle, les propriétés associées à un phénomène quantique sont subjectives : elles doivent obligatoirement être choisies, de manière arbitraire, par l'expérimentateur, à l'exclusion de leurs propriétés complémentaires.

Mais d'après la variante radicale de Bohr, en vertu de la notion de nécessité conjointe, le phénomène quantique est défini par l'ensemble de tout ce qui *peut* devenir réel au cours de tous les actes d'observation possibles pouvant être réalisés dans un dispositif expérimental donné et sur un type donné de particule. En vertu de la notion de nécessité conjointe, les propriétés associées à un phénomène quantique sont l'ensemble de toutes les propriétés potentielles. Mais, en vertu de la notion d'exclusion mutuelle, il existe des paires de propriétés qui ne peuvent pas devenir réelles simultanément, la réalité de l'une excluant celle de l'autre : ce sont les grandeurs dynamiques position et vitesse et les aspects onde et corpuscule

Défini en vertu de la notion de nécessité conjointe, l'ensemble de toutes les propriétés potentielles associé à un phénomène quantique est objectif : il est indépendant de ce qui devient effectivement réel au cours d'un acte d'observation, donc des choix de l'expérimentateur. Mais en vertu de la notion d'exclusion mutuelle, les propriétés associées à un phénomène quantique qui deviennent effectivement réelles au cours d'un acte d'observation sont relatives : elles doivent obligatoirement être choisies, de manière arbitraire, par l'expérimentateur parmi l'ensemble objectif de toutes les propriétés potentielles, à l'exclusion de leurs propriétés complémentaires

En omettant la notion de nécessité conjointe, la première variante subjectiviste fait disparaître l'idée de l'ensemble objectif de toutes les propriétés potentielles : c'est ainsi que l'idée de relativité se transforme en celle de subjectivité. Le terme « relatif » signifie

« devant être choisi parmi un ensemble objectif » alors que le terme « subjectif » signifie simplement « devant être choisi ».

Les principes du réalisme et d'objectivité ne constituent pas deux formulations différentes d'une seule et même idée ; ils expriment, au contraire, deux idées bel et bien distinctes. Alors que le principe du réalisme signifie le caractère objectif de ce qui est réel, le principe de complémentarité signifie le caractère objectif de ce qui existe à titre potentiel et le caractère relatif (ni objectif, mais ni subjectif) de ce qui est effectivement réel. Selon l'interprétation de Copenhague, le renoncement au réalisme à l'échelle quantique de la réalité ne signifie pas le renoncement au caractère objectif des phénomènes quantiques, mais le renoncement au caractère universel (absolu) de ce qui est effectivement réel. La notion d'exclusion mutuelle renvoie au caractère relatif de ce qui est effectivement réel ; celle de nécessité conjointe au caractère objectif et universel (absolu) de ce qui existe à titre potentiel.

### Deux arguments contre la matérialisation des choix de l'expérimentateur

(1) Un argument philosophique. Comme nous venons de l'indiquer, le sens véritable du quantum d'action et du principe de complémentarité n'est pas le caractère subjectif de la réalité à l'échelle quantique, mais son caractère relatif. La première variante subjectiviste est un détournement de la variante radicale de Bohr qui s'obtient en omettant la notion de nécessité conjointe du principe de complémentarité.

(2) Un argument scientifique. Rappelons que le principe de complémentarité est issu de l'interprétation de Copenhague, qui relève de la philosophie, et non de la mécanique quantique, qui relève de la science. Quant à la science, absolument rien dans la théorie quantique (que l'on tienne compte ou non de la théorie de la décohérence, venue bien après l'interprétation de Copenhague) n'implique une dépendance des phénomènes quantiques par rapport aux choix de l'expérimentateur. Absolument rien dans le formalisme mathématique de la mécanique quantique, présenté dans la première partie de ce texte, n'implique qu'un phénomène quantique soit créé et façonné selon la volonté de l'expérimentateur.

## **10.2 La matérialisation des perceptions de l'expérimentateur**

La deuxième variante subjectiviste va beaucoup plus loin que la description de l'acte d'observation donnée par l'interprétation de Copenhague (voir la section 8.9). Selon la deuxième variante subjectiviste, ce sont les actes de perception réalisés par des êtres dotés de conscience qui donnent réalité aux phénomènes et déterminent les propriétés qu'ils acquièrent. Ce serait donc uniquement l'enregistrement d'une perception dans la mémoire de l'expérimentateur, donc la production de quelque chose d'*observé par un être conscient*, qui atteste de la réalité d'une particule. La perception effectuée par l'expérimentateur est la cause qui donne réalité à la particule et à la grandeur dynamique mesurée par l'instrument ; cette grandeur dynamique est définie de manière acausale et aléatoire. Cette grandeur dynamique n'appartient pas à la particule, elle n'appartient pas non plus conjointement et de manière indissociable à la particule et à l'instrument, mais

elle appartient conjointement et de manière indissociable à la particule, à l'instrument *et à l'expérimentateur*. Elle émerge de la conscience de l'expérimentateur. La présence d'un être doté de conscience est un préalable indispensable pour qu'une particule quantique devienne réelle et acquiert des propriétés. Seul l'*acte de perception* d'un *être conscient* peut causer la matérialisation d'une particule quantique ; la particule n'est alors réelle que pour la durée de l'interaction avec l'instrument qui fournit la donnée à l'expérimentateur. Les conditions d'observation incluent non seulement le dispositif expérimental et les instruments, mais jusqu'à l'expérimentateur lui-même. Le phénomène quantique n'est rien d'autre que la matérialisation des perceptions de l'expérimentateur. Il n'existe de phénomènes quantiques réels que ceux perçus par un être doté de conscience.

Comment passe-t-on de la variante radicale de Bohr à la deuxième variante subjectiviste ? Tout simplement en jouant sur le sens des mots « observation » et « observateur ». Comme nous l'avons indiqué à la section 3.4, en physique, le terme « observation » désigne d'abord et avant tout une interaction entre un objet et un instrument, un phénomène physique, et le terme « observateur » l'instrument, un objet inanimé. Mais avec la deuxième variante subjectiviste, le terme « observation » désigne nécessairement une perception réalisée par un être doté de conscience, un phénomène psychologique, et le terme « observateur » cet être doté de conscience, l'expérimentateur. Avec ce double glissement de sens, le positivisme, qui sert de fondement à l'interprétation de Copenhague et selon lequel toute entité réelle est nécessairement observable (que ce soit par un instrument inanimé ou un être doté de conscience), est transformé en subjectivisme, selon lequel une entité n'est réelle que lorsqu'elle est en train d'être *observée par un être conscient*.

Les deux variantes subjectivistes ne sont pas incompatibles : elles peuvent être fusionnées en une unique interprétation subjectiviste globale.

#### Quatre arguments contre la matérialisation des perceptions de l'expérimentateur

(1) Un argument philosophique. Comme nous venons de le mentionner, la description de l'acte d'observation donnée par la variante radicale de Bohr n'implique pas la nécessité que l'expérimentateur prenne conscience des résultats indiqués par les instruments : l'action d'un instrument classique, soumis au principe du réalisme, suffit à elle seule à donner réalité à une particule quantique et à déterminer une propriété qu'elle acquiert. L'appel à l'acte de perception de l'expérimentateur pour causer la réduction d'un état superposé est superflu. La deuxième variante subjectiviste est un détournement de la variante radicale de Bohr, obtenue en jouant sur le sens des mots « observation » et « observateur ».

(2) Un argument scientifique. Rappelons que la variante radicale de Bohr fait partie de l'interprétation de Copenhague, qui relève de la philosophie, et non de la mécanique quantique, qui relève de la science. Quant à la science, aucun élément du formalisme mathématique de la mécanique quantique ne se réfère aux perceptions de l'expérimentateur (à ne pas confondre avec les résultats affichés par les instruments !), comme le lecteur a pu le constater en parcourant la première partie de ce texte.

Absolument rien dans la théorie quantique (que l'on tienne compte ou non de la théorie de la décohérence, venue bien après l'interprétation de Copenhague) n'implique une dépendance des phénomènes quantiques par rapport aux perceptions de l'expérimentateur.

(3) Un argument scientifique. La seconde variante subjectiviste est incompatible avec l'existence d'expériences automatisées de physique quantique, qui se déroulent en l'*absence* d'expérimentateurs. Les expériences automatisées de physique quantique prouvent la non-existence d'une relation directe entre perceptions et phénomènes quantiques.

(4) Un argument scientifique. Supposer l'existence d'un lien direct entre perception et phénomènes quantiques nous force, en raison de l'impossibilité d'une cause naturelle à celui-ci, à concevoir l'esprit comme une entité surnaturelle, c'est-à-dire existant à l'extérieur de la nature, à l'extérieur de la réalité matérielle, de manière indépendante du cerveau. Toute théorie et toute interprétation qui fait appel au surnaturel, comme la deuxième variante subjectiviste, que ce soit explicitement ou implicitement, est incompatible avec la science (avec son principe premier, le principe d'objectivité) et doit être écartée de toute conception de la réalité qui veut se fonder sur la science.

### **10.3 Autre argument contre les deux variantes subjectivistes**

Un argument scientifique. Rappelons qu'aujourd'hui, la théorie de la décohérence (qui relève de la science), parce qu'elle traite autant des phénomènes quantiques naturels qu'artificiels, réfute la variante radicale de Bohr (qui relève de la philosophie), selon laquelle il n'existe de phénomènes quantiques réels que ceux produits dans un dispositif expérimental. Or, les deux variantes subjectivistes (qui relèvent aussi de la philosophie) dérivent de cette dernière : elles impliquent également qu'il n'existe de phénomènes quantiques réels que ceux produits dans un dispositif expérimental. Les deux variantes subjectivistes sont par conséquent elles-mêmes réfutées par la théorie de la décohérence. D'ailleurs, un phénomène naturel (telles les réactions de fusion nucléaire se déroulant au cœur des étoiles), par définition, a lieu spontanément à l'extérieur de tout dispositif expérimental ; par définition, il est indépendant des choix et des perceptions de tout être doté de conscience !

Dans le cadre de la critique de la deuxième variante subjectiviste, l'existence de phénomènes quantiques naturels s'ajoute à celle des expériences automatisées de physique quantique et prouve à son tour la non-existence d'un lien direct entre perceptions et phénomènes quantiques.

### **10.4 Conclusion**

Les deux variantes de l'interprétation subjectiviste, celle de la « matérialisation des choix de l'expérimentateur » et celle de la « matérialisation des perceptions de l'expérimentateur », constituent des interprétations de l'interprétation de Copenhague (plus spécifiquement de la variante radicale de Bohr) et non des interprétations directes

de la mécanique quantique. Elles se situent à un second niveau d'interprétation philosophique, bien éloigné de la science ! Une interprétation subjectiviste globale qui serait le résultat de la fusion de ces deux variantes formerait un troisième niveau d'interprétation philosophique.

Les tenants de l'interprétation subjectiviste (de l'une ou l'autre des trois variantes) considèrent que celle-ci est impliquée par l'interprétation de Copenhague. Or, l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie) est presque systématiquement confondue avec la mécanique quantique (qui relève de la science). Les tenants de l'interprétation subjectiviste soutiennent ainsi que c'est la mécanique quantique elle-même (la science) qui nous enseigne que la réalité est fondamentalement subjective, qu'elle dépend des choix et/ou des perceptions des êtres dotés de conscience. Les êtres dotés de conscience en général et l'être humain en particulier deviennent le centre philosophique de l'Univers, ils donnent réalité à celui-ci et déterminent ses propriétés par leurs choix et/ou leurs perceptions. Les grandeurs dynamiques qui deviennent réelles sont définies de manière acausale et aléatoire.

L'interprétation subjectiviste, avec ses trois variantes, est extrêmement populaire chez les gourous du Nouvel-Âge et chez nombre de philosophes ; elle se situe souvent au cœur des conceptions irrationnelles de la réalité qu'ils professent. La mécanique quantique est alors invoquée comme fondement, justification ou preuve scientifique de telles conceptions. Cela est aussi vrai, malheureusement, de certains physiciens et journalistes scientifiques qui, de par leur statut, confèrent à l'interprétation subjectiviste, avec ses trois variantes, l'apparence d'une crédibilité qu'elle ne possède pas.

Il faut ici spécifier que les idées principales véhiculées par les différentes variantes subjectivistes sont beaucoup plus anciennes que la mécanique quantique et l'interprétation de Copenhague. Ce qui est nouveau avec la venue de la mécanique quantique et de l'interprétation de Copenhague, c'est la prétention à asseoir ces idées sur la science. Les scientifiques, avec leur raison et leurs instruments, auraient fini, tardivement et péniblement, par découvrir et prouver ce que les grands sages de l'histoire, avec leur intuition et/ou leur foi, ont toujours su !

L'interprétation subjectiviste, avec ses trois variantes, est irrationnelle car en contradiction avec la physique (la science). Elle est aussi en contradiction avec la variante radicale de Bohr de l'interprétation (philosophique) de Copenhague, dont elle dérive pourtant. Selon la physique et l'interprétation de Copenhague, la réalité (matérielle) est indépendante de l'esprit.

## Chapitre 11

### Le chat de Schrödinger

En 1935, Erwin Schrödinger présente une expérience de pensée qui implique un chat. Celle-ci expose le caractère problématique, mal défini, du concept de la frontière quantique-classique et mène à la réfutation de l'interprétation de Copenhague. Schrödinger prétend de plus faire la preuve que la mécanique quantique doit nécessairement être interprétée à la lumière du réalisme. Rappelons qu'en 1935, la théorie de la décohérence n'existait pas encore.

#### 11.1 L'expérience de pensée du chat de Schrödinger

Supposons que l'on place à l'intérieur d'une boîte un échantillon d'une substance radioactive, un compteur Geiger (il s'agit d'un instrument qui détecte la radioactivité émise lorsqu'un atome se désintègre), un marteau, une fiole contenant un poison mortel et un chat. Ces objets sont reliés ainsi : si le compteur Geiger détecte qu'un atome de l'échantillon se désintègre, il relâche le marteau, qui s'abat alors sur la fiole et la brise, ce qui libère le poison et le chat meurt. L'expérimentateur ferme la boîte et attend une heure, après quoi il l'ouvre à nouveau et observe son contenu. (Il s'agit d'une expérience purement potentielle ; aucun chat réel n'a été maltraité.)

Interprétons cette expérience de pensée à la manière de Copenhague. L'expérimentateur tient le rôle de l'instrument classique. La frontière quantique-classique doit être tracée entre lui et le contenu de la boîte. Tous les objets placés à l'intérieur de la boîte sont traités comme des objets observés quantiques. Au moment où la boîte sera ouverte, l'interaction entre les objets observés quantiques et l'instrument classique qu'est l'expérimentateur sera réalisée par la lumière qui éclairera le contenu de la boîte et sera réfléchi vers les yeux de l'expérimentateur.

Le dispositif expérimental a pour effet de rendre interdépendants les états de tous les objets placés à l'intérieur de la boîte. Puisque ceux-ci sont traités comme des objets quantiques, on doit considérer qu'ils s'intriquent, constituent un système quantique unique et doivent être représentés, dans la théorie, par une fonction d'onde unique – comme si tous les objets placés à l'intérieur de la boîte devenaient physiquement inséparables. Le terme « intrication » a été introduit en physique quantique par Schrödinger en 1935 dans le contexte de cette expérience de pensée.

Supposons que durant la période d'attente d'une heure, pendant laquelle la boîte demeure fermée, il y ait 50 % de chances qu'au moins un atome de l'échantillon radioactif se désintègre et 50 % de chances qu'aucun ne se désintègre. Après cette période, tout juste avant le moment de l'ouverture de la boîte, le système quantique intriqué se trouve dans l'état superposé décrit par le vecteur d'état suivant :

| **atome(s) désintégré(s), Geiger activé, marteau tombé, fiole brisée, chat mort** ›  
 ET  
 | **atomes intacts, Geiger non activé, marteau debout, fiole intacte, chat vivant** ›.

L'ouverture de la boîte provoque l'interaction entre l'expérimentateur, qui tient le rôle de l'instrument classique, et le contenu de la boîte, un système quantique intriqué, par l'intermédiaire de la lumière. Cette interaction cause la réduction non unitaire de l'état du système quantique intriqué : celui-ci se retrouve dans un état unique (classique), au hasard. Nous, qui ne savons pas ce que l'expérimentateur observe, décrivons cet état par le mélange statistique suivant :

| **atome(s) désintégré(s), Geiger activé, marteau tombé, fiole brisée, chat mort** ›  
 OU  
 | **atomes intacts, Geiger non activé, marteau debout, fiole intacte, chat vivant** ›.

Selon l'interprétation de Copenhague, pendant l'heure où la boîte demeure fermée, son contenu se dématérialise. L'état du contenu de la boîte devient incertain (indéfini, flou) ; il devient un ensemble de possibilités ayant différentes probabilités de devenir réelles lorsque la boîte sera ouverte. Si l'on s'intéresse au cas spécifique du chat, celui-ci se retrouve dans un état où il n'est ni mort, ni vivant (bien au contraire) ! Pour le dire autrement, il se retrouve simultanément mort ET vivant !

Le contenu de la boîte se matérialise seulement en conséquence d'être observé, au moment où la boîte est ouverte. Son état, qui devient alors réel, émerge d'un niveau de réalité qui n'existe qu'à titre potentiel ; cet état est défini de manière acausale et aléatoire. Notamment, le chat ne se retrouve dans un état défini, ne *devient* mort OU vivant, de manière acausale et aléatoire, qu'en conséquence d'être observé !

## 11.2 La réfutation de l'interprétation de Copenhague

D'une part, selon l'interprétation de Copenhague, la mobilité de la frontière quantique-classique est telle que toute particule doit être placée en tout temps du côté quantique, mais qu'un corps peut être placé arbitrairement du côté classique ou quantique. Le principe de correspondance garantit que la description quantique d'un corps est équivalente à sa description classique (voir les sections 5.4 et 8.9). D'autre part, ce que l'expérience de pensée de Schrödinger expose, c'est que dans une situation où l'état d'un objet classique (par exemple le chat) est couplé à celui d'un objet quantique (par exemple l'échantillon radioactif), placer arbitrairement l'objet classique d'un côté ou de l'autre de la frontière engendre deux descriptions radicalement différentes. Dans le cadre de l'interprétation de Copenhague, le couplage de l'état d'un objet classique à celui d'un objet quantique a pour conséquence que la description quantique de cet objet classique n'est plus équivalente à sa description classique. Schrödinger considère avoir démontré que la frontière quantique-classique est un concept problématique, mal défini, qui constitue une faille dans l'interprétation de Copenhague.

Or, il ne saurait être question de renoncer au principe du réalisme à l'échelle classique de la réalité (un chat doit toujours être, par lui-même, mort OU vivant, indépendamment qu'il soit observé ou non). Celui-ci est issu de notre intuition, elle-même fondée sur l'observation de la réalité à notre échelle, par l'entremise de nos sens et d'instruments. De plus, à la fois la physique classique et la physique quantique impliquent la subordination de l'échelle classique de la réalité au principe du réalisme (voir la section 6.2). Par conséquent, toute interprétation de la mécanique quantique qui autorise qu'un renoncement au réalisme ait lieu à l'échelle classique de la réalité doit être rejetée. Or, la frontière quantique-classique, parce qu'elle est un concept mal défini, permet cela par sa mobilité. Schrödinger considère que la frontière quantique-classique est une faille qui est fatale à l'interprétation de Copenhague : il considère qu'elle mène à sa réfutation.

### **11.3 La preuve du réalisme à l'échelle quantique ?**

Selon Schrödinger, étant donné l'existence de situations où l'état d'un objet classique peut être couplé à celui d'un objet quantique, toute interprétation qui supposerait le renoncement au réalisme à l'échelle quantique impliquerait inéluctablement que ce renoncement se transfère à l'échelle classique, même à des êtres dotés de conscience. Or, cela est inacceptable. Par conséquent, l'hypothèse du renoncement au réalisme à l'échelle quantique de la réalité doit être rejetée. Schrödinger considère avoir fait la preuve que la mécanique quantique doit nécessairement être interprétée à la lumière du réalisme.

### **11.4 Le chat de Schrödinger et la théorie de la décohérence**

Aujourd'hui, la théorie de la décohérence (qui relève de la science) résout le problème posé par la frontière quantique-classique de l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie), soit la possibilité que le renoncement au réalisme se transfère à l'échelle classique de la réalité. Dans le cas de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, il y a réduction de l'état quantique de l'échantillon radioactif au niveau de son interaction avec le compteur Geiger, un objet macroscopique.

Si l'on avait analysé l'expérience de pensée du chat de Schrödinger à la lumière de l'interprétation existentielle, que l'on obtient en « révisant et en corrigeant » l'interprétation de Copenhague par la théorie de la décohérence (voir la section 8.11), le renoncement au réalisme ne se serait jamais transféré à l'échelle classique de la réalité et l'on n'aurait jamais fait face à la possibilité qu'un chat soit simultanément mort ET vivant (ou ne soit ni l'un ni l'autre). L'expérience de pensée du chat de Schrödinger, qui date de 1935, réfute l'interprétation de Copenhague, qui date de 1928, mais elle ne réfute pas l'interprétation existentielle, qui est en développement depuis 1991. Avec la théorie de la décohérence, qui date de 1952 et dont le développement véritable commence en 1981, l'interprétation existentielle interdit que le renoncement au réalisme appliqué à l'échelle quantique puisse se transférer à l'échelle classique dans les situations où l'état d'un objet classique est couplé à celui d'un objet quantique ; elle impose au contraire que ce soit alors le réalisme de l'échelle classique qui se transfère à l'échelle quantique. Parce que l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, bien qu'elle réfute l'interprétation de Copenhague, ne réfute pas l'interprétation existentielle, il faut conclure qu'elle ne prouve

pas que la mécanique quantique doive nécessairement être interprétée à la lumière du réalisme.

## Chapitre 12

### L'interprétation de l'influence de la conscience

En 1961, le physicien Eugène Wigner propose une nouvelle interprétation de la mécanique quantique qu'il extrapole de l'interprétation de Copenhague. Il la développe en analysant une expérience de pensée nommée « l'ami de Wigner ». Wigner souscrit à l'interprétation de Copenhague et en explore les implications ultimes en poussant la frontière quantique-classique jusqu'aux limites de sa mobilité. Wigner ne voit aucun problème dans le fait que cette mobilité permette, comme l'expérience de pensée du chat de Schrödinger l'a démontré, le transfert du renoncement au réalisme de l'échelle quantique à l'échelle classique, ne tenant pas compte qu'un tel transfert est en contradiction avec toutes les observations effectuées à l'échelle classique de la réalité ainsi qu'avec les théories classique et quantique (voir la section 6.2). Mais il refuse que le renoncement au réalisme soit transféré à la conscience : ce refus sera l'élément fondateur de son interprétation. La théorie de la décohérence existait en 1961, mais ne commencera à être véritablement développée qu'à partir de 1981 ; Wigner n'en tient pas compte.

#### 12.1 L'expérience de pensée de l'ami de Wigner

Soit un atome qui émet un photon. Supposons que le dispositif expérimental soit conçu de sorte que ce photon soit envoyé dans un système optique macroscopique qui peut le diriger dans deux directions possibles, vers la gauche ou vers la droite. Un expérimentateur, l'ami de Wigner, se situe dans l'une de ces deux directions, disons vers la gauche.

Interprétons cette expérience de pensée à la manière de Copenhague. La frontière quantique-classique doit être tracée entre l'ami de Wigner, qui tient le rôle de l'instrument classique, et le dispositif expérimental, qui constitue le système observé quantique. L'atome, le photon et le système optique s'intriquent, constituent un système quantique unique et doivent être représentés, dans la théorie, par une fonction d'onde unique – comme s'ils devenaient physiquement inséparables. Une fois le photon émis, le système quantique intriqué se retrouve dans l'état superposé décrit par le vecteur d'état suivant :

$$| \text{photon vers gauche} \rangle \text{ ET } | \text{photon vers droite} \rangle.$$

L'ami de Wigner a un corps qui comprend notamment ses yeux, ses nerfs optiques et son cerveau et qui est un objet matériel. Ne devrait-on pas ici déplacer la frontière quantique-classique de sorte à faire passer l'ami de Wigner du côté quantique de celle-ci, même s'il est un être doté de conscience ? Un instrument classique approprié pour observer l'ami de Wigner pourrait être un autre expérimentateur, par exemple Wigner lui-même.

Si l'on s'engage dans cette avenue, on doit considérer que le corps de l'ami de Wigner s'intrique au système quantique déjà intriqué composé de l'atome, du photon et du système optique et en devient un élément supplémentaire – comme si son corps devenait

physiquement inséparable de ces objets. Ce nouveau système quantique intriqué se retrouve dans un nouvel état superposé décrit par un nouveau vecteur d'état :

$$\begin{aligned} &| \text{photon vers gauche, ami perçoit photon} \rangle \\ &\quad \text{ET} \\ &| \text{photon vers droite, ami ne perçoit rien} \rangle. \end{aligned}$$

Selon ce point de vue, l'ami de Wigner, un être doté de conscience, se retrouve lui-même dans un état superposé : il perçoit le photon ET ne perçoit rien simultanément (ou ni l'un ni l'autre, bien au contraire) !

Supposons que Wigner arrive sur les lieux de l'expérience immédiatement après que l'atome a émis le photon. La frontière quantique-classique est maintenant tracée entre lui, l'instrument classique, et le système intriqué observé, quantique, composé de l'atome, du photon, du système optique et du corps de l'ami de Wigner. Wigner demande alors à son ami s'il a perçu le photon ou non. Wigner effectue à son tour une observation : il perçoit la réponse donnée par son ami, « oui » OU « non », par la réaction de ses propres oreilles, nerfs auditifs et de son propre cerveau aux ondes produites dans l'air par les cordes vocales de son ami et enregistre la réponse dans sa mémoire. Doit-on conclure que c'est à ce moment que l'état superposé du système quantique intriqué est réduit à un état unique :

$$\begin{aligned} &| \text{photon vers gauche, ami perçoit photon} \rangle \\ &\quad \text{OU} \\ &| \text{photon vers droite, ami ne perçoit rien} \rangle ? \end{aligned}$$

## 12.2 L'interprétation de l'influence de la conscience

Wigner fait valoir qu'il est admis de manière générale que le phénomène de la sensation est partagé chez les êtres dotés de conscience (c'est-à-dire les animaux, incluant les humains) qui sont équipés d'organes sensoriels équivalents. Par conséquent, les phénomènes doivent être perçus de manière équivalente par des êtres conscients équipés d'organes sensoriels équivalents.

Wigner en déduit que le résultat de l'expérience doit être perçu de la même manière par son ami et lui. Son ami devait donc déjà avoir une réponse unique, « j'ai perçu le photon » OU « je n'ai rien perçu », avant même que Wigner ne lui pose la question, ce que son ami pourrait d'ailleurs confirmer. Ainsi, l'état du système quantique intriqué, composé de l'atome, du photon, du système optique et du corps de l'ami de Wigner, devait déjà avoir été réduit à un état unique avant même que Wigner ne pose sa question. La cause de cette réduction doit être attribuée à l'observation effectuée par l'ami de Wigner et non à celle effectuée par Wigner lui-même. De manière générale, l'état superposé d'un système quantique doit être réduit dès sa première observation par un être doté de conscience. Selon Wigner, il n'y a aucun problème à ce que le renoncement au réalisme soit transféré à des objets classiques matériels (comme un instrument de mesure ou le corps d'un être doté de conscience), mais, parce que les phénomènes doivent être perçus de manière équivalente par des êtres conscients équipés d'organes sensoriels

équivalents, le renoncement au réalisme ne peut pas être transféré à la conscience. Wigner conclut que, dans une expérience de physique quantique, un être doté de conscience et un instrument inanimé ont des comportements différents et jouent des rôles différents.

Selon Wigner, c'est donc l'acte de perception par une conscience qui est la cause de la réduction d'un état quantique. La mobilité de la frontière quantique-classique est telle que tout objet matériel agissant en tant qu'observateur d'un système quantique qui se trouve dans un état superposé, que cet objet matériel soit un instrument inanimé, le *corps* d'un être conscient ou jusqu'au « reste de l'Univers », passe du côté quantique de la frontière, s'intrique avec le système quantique et se retrouve à son tour dans un état superposé. En vertu de la mobilité de la frontière quantique-classique, qui n'a de limite que celle de faire passer jusqu'à l'Univers entier du côté quantique, aucun objet matériel n'a le pouvoir de causer la réduction d'un état superposé. Seule une entité qui se situe hors de portée de la frontière quantique-classique possède ce pouvoir, une entité nécessairement extérieure à la réalité matérielle : la conscience. Telle est la signification ultime que Wigner donne à l'effet de l'observateur en mécanique quantique.

Revenons à l'expérience de pensée de l'ami de Wigner. Au moment où celui-ci observe le système quantique intriqué composé de l'atome, du photon et du système optique, son corps, qui inclut notamment ses yeux, ses nerfs optiques et son cerveau, passe du côté quantique de la frontière, s'intrique avec le système quantique observé et se retrouve à son tour dans un état superposé. Ce nouveau système quantique intriqué se retrouve bel et bien dans le nouvel état superposé décrit par le nouveau vecteur d'état :

**| photon vers gauche, cerveau perçoit photon >**  
ET  
**| photon vers droite, cerveau ne perçoit rien >**.

Le système quantique intriqué est dématérialisé. Son état est incertain (indéfini, flou) ; il est un ensemble de possibilités ayant différentes probabilités de devenir réelles lorsqu'une conscience surnaturelle effectuera un acte de perception.

C'est alors que la conscience surnaturelle de l'ami de Wigner prend une décision : de l'ensemble de possibilités qui est devant elle, elle n'en sélectionne qu'une seule, qu'elle perçoit et enregistre dans sa mémoire (l'acuité de cette sélection pouvant être, le cas échéant, limitée par la marge d'incertitude de l'instrument inanimé utilisé, ce qui n'est pas le cas dans la situation analysée ici). Cet acte de perception cause la réduction de l'état superposé du système quantique intriqué, composé de l'atome, du photon, du système optique et du corps de l'ami de Wigner (incluant notamment ses yeux, ses nerfs optiques et son cerveau), à l'état unique ainsi sélectionné, donnant du coup réalité à cet état. Le système quantique se matérialise dans un état qui émerge de la conscience surnaturelle de l'expérimentateur. Cet état est défini de manière *causale* (selon Wigner, l'acte de perception est la cause qui, non seulement donne réalité au phénomène et détermine les propriétés qu'il acquiert, mais qui, en plus, dans le cas des grandeurs dynamiques, décide

parmi chaque ensemble de possibilités laquelle devient réelle ; comparer avec les sections 8.5 et 10.2) et *volontaire* (ni aléatoire ni déterministe).

### 12.3 Arguments contre l'influence de la conscience

(1) Un argument scientifique. Aucun élément du formalisme mathématique de la mécanique quantique (que l'on tienne compte ou non de la théorie de la décohérence, qui n'est pas intégrée à l'interprétation de Wigner) n'est mis en correspondance avec la conscience de l'expérimentateur, ni avec les actes de perception qu'elle effectue (à ne pas confondre avec les résultats affichés par les instruments !), ni avec les décisions qu'elle prend, comme le lecteur a pu le constater en parcourant la première partie de ce texte. Il en va de même de la physique classique. Absolument rien dans la physique, quantique et classique, n'implique une influence de la conscience sur les phénomènes physiques, qu'ils soient quantiques ou classiques.

(2) Un argument scientifique. L'interprétation de l'influence de la conscience est incompatible avec l'existence d'expériences de physique automatisées, qu'elles portent sur des phénomènes quantiques ou classiques, qui se déroulent donc en l'*absence* d'expérimentateurs. L'existence de telles expériences prouve la non-existence de l'influence de la conscience.

(3) Un argument scientifique. Pour que son interprétation fonctionne, Wigner doit nécessairement supposer que la conscience soit une entité extérieure à la réalité matérielle, une entité surnaturelle, sans quoi elle se situerait à la portée de la frontière quantique-classique, pourrait passer du côté quantique de celle-ci et se retrouver dans un état superposé. Toute théorie et toute interprétation qui fait appel au surnaturel est incompatible avec la science (avec son principe premier, le principe d'objectivité) et doit être écartée de toute conception de la réalité qui veut se fonder sur la science.

(4) Un argument scientifique. Aujourd'hui, la physique quantique, par l'entremise de la théorie de la décohérence, traite autant des phénomènes quantiques naturels qu'artificiels. De son côté, la physique classique a de tout temps fait de même avec les phénomènes classiques. Or, un phénomène naturel, par définition, se déroule de manière indépendante des perceptions et des décisions de tout être doté de conscience ! En traitant des phénomènes naturels, quantiques et classiques, la physique réfute l'interprétation de l'influence de la conscience.

L'existence de phénomènes physiques naturels, quantiques et classiques, s'ajoute à celle des expériences de physique automatisées prouve à son tour la non-existence d'une influence de la conscience.

(5) Un argument scientifique. Aujourd'hui, la théorie de la décohérence (qui relève de la science) résout le problème posé par la frontière quantique-classique de l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie), soit la possibilité que le renoncement au réalisme se transfère à l'échelle classique de la réalité, détruisant du coup les fondements (philosophiques et non scientifiques) de l'interprétation de l'influence de la conscience.

Dans le cas de l'expérience de pensée de l'ami de Wigner, il y a réduction de l'état quantique du sous-système quantique composé de l'atome et du photon au niveau de son interaction avec le système optique, un objet macroscopique, donc dès que le photon s'engage dans ce dernier.

Si l'on avait analysé l'expérience de pensée de l'ami de Wigner à la lumière de l'interprétation existentielle, que l'on obtient en «révisant et en corrigeant» l'interprétation de Copenhague par la théorie de la décohérence (voir la section 8.11) et qui n'est pas réfutée par l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, le renoncement au réalisme ne se serait jamais transféré à l'échelle classique de la réalité et l'on n'aurait jamais fait face à la possibilité que le cerveau d'un expérimentateur se retrouve dans un état superposé, ni à celle que jusqu'à l'Univers entier se retrouve dans un état superposé. Avec la théorie de la décohérence, l'interprétation existentielle interdit que le renoncement au réalisme appliqué à l'échelle quantique puisse se transférer à l'échelle classique dans les situations où l'état d'un objet classique est couplé à celui d'un objet quantique ; elle impose au contraire que ce soit alors le réalisme de l'échelle classique qui se transfère à l'échelle quantique. L'appel à une entité extérieure à la réalité matérielle, une conscience surnaturelle, pour causer la réduction d'un état superposé aurait été superflu. Cet argument fait suite à l'argument n° 4.

## 12.4 Conclusion

L'interprétation de l'influence de la conscience est une interprétation de l'interprétation de Copenhague et non une interprétation directe de la mécanique quantique. Elle se situe à un second niveau d'interprétation philosophique, bien éloigné de la science !

Les tenants de l'interprétation de l'influence de la conscience considèrent que celle-ci est impliquée par l'interprétation de Copenhague. Or, l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie) est presque systématiquement confondue avec la mécanique quantique (qui relève de la science). Les tenants de l'interprétation de Wigner soutiennent ainsi que c'est la mécanique quantique elle-même (la science) qui nous révèle que tous les phénomènes physiques, quantiques et classiques, dépendent de l'influence d'une conscience surnaturelle, extérieure à la réalité matérielle. Avec l'interprétation de l'influence de la conscience, comme c'était le cas avec les variantes de l'interprétation subjectiviste, les êtres dotés de conscience en général et l'être humain en particulier deviennent le centre philosophique de l'Univers : ce sont leurs actes de perception qui donnent réalité aux phénomènes physiques, quantiques et classiques, qui déterminent les propriétés qu'ils acquièrent et qui définissent de manière causale et volontaire, par une prise de décision, les grandeurs dynamiques.

L'interprétation de l'influence de la conscience, tout comme les autres variantes de l'interprétation subjectiviste, est extrêmement populaire chez les gourous du Nouvel-Âge et chez nombre de philosophes ; elle se situe elle souvent au cœur des conceptions irrationnelles de la réalité qu'ils professent. La mécanique quantique est alors invoquée comme fondement, justification ou preuve scientifique de telles conceptions. Cela est aussi vrai, malheureusement, de certains physiciens (notamment Wigner !) et journalistes

scientifiques qui, de par leur statut, confèrent à l'interprétation de l'influence de la conscience, ou à toute autre variante subjectiviste, l'apparence d'une crédibilité qu'elle ne possède pas.

Il faut ici spécifier que les idées principales véhiculées par l'interprétation de l'influence de la conscience, comme celles véhiculées par les multiples variantes de l'interprétation subjectiviste, sont beaucoup plus anciennes que la mécanique quantique et l'interprétation de Copenhague. Ce qui est nouveau avec la venue de la mécanique quantique et de l'interprétation de Copenhague, c'est la prétention à asseoir ces idées sur la science.

L'interprétation de l'influence de la conscience, comme toutes les variantes de l'interprétation subjectiviste, est irrationnelle car en contradiction avec la physique (la science). Elle émerge d'une faille logée dans l'interprétation (philosophique) de Copenhague, au niveau de la frontière quantique-classique, qui a été exposée par l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Selon la physique, la réalité (matérielle) est globalement objective (indépendante de l'esprit), aux échelles quantique et classique.

## Chapitre 13

### Le paradoxe EPR

Revenons à la controverse Bohr-Einstein, qui se déroule de 1920 à 1935, bien avant la venue de la théorie de la décohérence. En 1935, Albert Einstein et deux autres physiciens, Boris Podolsky et Nathan Rosen (désignés tous les trois par leurs initiales EPR), publient un article intitulé « La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée complète ? » Leur réponse est « non ». Ils prétendent en faire la démonstration en analysant le cas particulier de deux particules intriquées. Selon leur argumentation, supposer, dans ce cas particulier, que la description quantique de la réalité est complète mène à une contradiction, ce qui prouverait le caractère incomplet de celle-ci. Cette argumentation est connue sous le nom de « paradoxe EPR ». Elle constituerait la réfutation de l'interprétation de Copenhague et la preuve de l'interprétation statistique (ou d'ensemble). Les physiciens EPR prétendent ainsi résoudre définitivement la controverse Bohr-Einstein. Notons que l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, présentée au chapitre 11, est une suite que ce dernier a donné au paradoxe EPR la même année – forcément, les physiciens EPR ne se réfèrent pas, dans leur argumentation, à la faille que constitue la frontière quantique-classique en permettant le transfert du renoncement au réalisme à l'échelle classique.

#### 13.1 La relation de Heisenberg : réalisme ou description complète ?

Les physiciens EPR commencent par démontrer qu'il n'existe que deux points de vue alternatifs possibles pour interpréter la mécanique quantique. Ils invoquent la relation de Heisenberg : celle-ci entraîne la conséquence que la théorie quantique (la science) ne peut pas représenter simultanément la position et la vitesse d'une particule par des valeurs numériques uniques. Cette caractéristique de la théorie quantique signifie que le principe du réalisme et l'idée que la description quantique de la réalité est complète sont incompatibles, que ce principe et cette idée sont, en quelque sorte, l'antithèse l'un de l'autre. En effet :

Ou bien (1) on admet le principe du réalisme à l'échelle quantique de la réalité et on conclut que la position et la vitesse d'une particule sont deux éléments de la réalité qui ne peuvent pas être représentés simultanément par des éléments correspondants de la théorie (par des valeurs numériques uniques). On conclut que la description quantique de la réalité est incomplète. Dans le cas d'une particule individuelle, une grandeur dynamique ne peut être représentée par une valeur numérique unique qu'à la suite d'une mesure et la connaissance ainsi obtenue est entachée de la marge d'incertitude de l'instrument. Ainsi, laquelle de la position ou de la vitesse d'une particule individuelle est connue est celle qui a été mesurée ; en absence de mesure, aucune n'est connue. La relation de Heisenberg est interprétée comme une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité ». Telle est le point de vue donné par l'interprétation statistique (ou d'ensemble).

Ou bien (2) on admet que la description quantique de la réalité est complète et on conclut que la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être simultanément des

éléments de la réalité. Laquelle est réelle est celle qui est représentée par un élément correspondant de la théorie (par une valeur numérique unique). Or, dans le cas d'une particule individuelle, une telle représentation ne peut exister qu'à la suite d'une mesure et la connaissance ainsi obtenue est entachée de la marge d'incertitude de l'instrument. Ainsi, laquelle de la position ou de la vitesse d'une particule individuelle est réelle est celle qui a été mesurée ; en absence de mesure, aucune n'est réelle. Ce sont les actes de mesure qui donnent réalité aux grandeurs dynamiques. On conclut qu'il faut renoncer au réalisme à l'échelle quantique de la réalité. La relation de Heisenberg est interprétée comme représentant « ce que la réalité est et fait ». Telle est le point de vue donné par l'interprétation de Copenhague.

### 13.2 Le critère de réalité EPR

Les éléments de la réalité doivent être trouvés par un appel aux résultats de mesures, d'observations et d'expériences. Pour identifier les éléments de la réalité, les physiciens EPR proposent un « critère de réalité » qui peut être énoncé comme suit (l'accord entre les prédictions tirées de la théorie quantique et les données étant établi) :

une grandeur dynamique (telles la position ou la vitesse) est un élément de la réalité si la théorie peut prédire avec certitude, c'est-à-dire avec une probabilité de 100 %, la valeur numérique unique par laquelle elle doit la représenter, et cela, par un calcul seul, sans qu'une mesure n'ait à être effectuée, sans perturber en aucune manière la particule.

### 13.3 Le paradoxe EPR

Voici l'argumentation des physiciens EPR. Elle fait la démonstration qu'ensemble, l'idée que la description quantique de la réalité est complète (qui implique le renoncement au réalisme à l'échelle quantique de la réalité) et le critère de réalité EPR mènent à une contradiction dans un cas particulier, celui de deux particules intriquées.

(a) Comme prémisses de départ, adoptons le point de vue (2), celui de l'interprétation de Copenhague.

(b) Soit deux particules qui se rencontrent puis se séparent dans l'espace. Au moment de leur rencontre, elles s'intriquent et constituent un système quantique unique. À partir de ce moment et tant que le système quantique unique qu'elles ont ainsi formé demeurera isolé de son environnement, les deux particules seront décrites, dans la théorie quantique, conjointement et de manière indissociable par une fonction d'onde unique, et ce, peu importe la distance qui les séparera par la suite – comme si elles étaient devenues physiquement inséparables. Selon la théorie quantique, les états respectifs de deux particules intriquées demeurent en tout temps corrélés, interdépendants. On suppose qu'après leur rencontre initiale, les deux particules n'interagissent plus.

L'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication a été mentionné pour la première fois par les physiciens EPR dans leur article de 1935. On emploie ainsi l'expression

« particules EPR » comme synonyme de « particules intriquées ». Notons que les physiciens EPR ne prétendaient pas avoir fait une découverte scientifique ; au contraire, ils prétendaient avoir mis en évidence un élément de la théorie quantique qui constitue un quatrième symptôme de son caractère incomplet (pour les trois premiers symptômes, voir les sections 7.3 et 7.4).

(c) Après un certain intervalle de temps, on effectue une mesure sur une seule des deux particules intriquées, que nous nommerons la particule I. Aucune action n'est entreprise sur l'autre, que nous nommerons la particule II. Selon la théorie quantique, la première interaction entre le système quantique intriqué et l'environnement détruit l'intrication. Dans la théorie, l'acte de la mesure ici effectué sur la particule I fait en quelque sorte éclater le paquet d'ondes unique. Il en subsiste un ensemble aléatoire de deux fragments individualisés et corrélés (couplés, interdépendants), un pour chacune des particules impliquées. Ces fragments constituent deux nouveaux paquets d'ondes, individualisés, corrélés et réduits. Chacun commence alors sa propre évolution unitaire, indépendante de celle de l'autre. Au moment où l'intrication est détruite, les états des deux particules concernées, représentés par ces nouveaux paquets d'ondes, sont toujours interdépendants. À partir de ce moment, les particules sont physiquement indépendantes l'une de l'autre.

Le résultat obtenu au hasard et affiché par l'instrument procure, à l'intérieur de sa marge d'incertitude, l'information sur la position ou la vitesse de la particule I, dépendamment de laquelle de ces deux grandeurs dynamiques est mesurée. Cette information est représentée, dans la théorie, par le paquet d'ondes individualisé et réduit associé à la particule I. Or, immédiatement après l'acte de la mesure, le paquet d'ondes individualisé et réduit associé à la particule II est corrélé à celui associé à la particule I : la connaissance du celui-ci obtenue par l'acte de la mesure procure automatiquement la connaissance de celui-là. Le résultat de la mesure, qui donne l'information sur la position ou la vitesse de la particule I, permet à la théorie de prédire avec certitude la valeur numérique unique qui doit représenter la même grandeur dynamique sur la particule II par un calcul seul, sans qu'aucune mesure ne soit effectuée sur la particule II, sans perturber en aucune manière la particule II, la précision du calcul dépendant de la précision de la mesure. Bien entendu, cette prédiction peut être vérifiée en effectuant une mesure simultanée sur la particule II.

La grandeur dynamique (position ou vitesse) qui est mesurée sur la particule I est bien évidemment un élément de la réalité puisqu'elle est représentée par un résultat affiché par un instrument. En vertu du critère de réalité EPR, on doit conclure que la même grandeur dynamique (position ou vitesse) est aussi un élément de la réalité dans le cas de la particule II.

(d) Ainsi, en conséquence de deux mesures différentes pouvant être effectuées sur la particule I, on doit conclure, en vertu du critère de réalité EPR, à la réalité soit de la position, soit de la vitesse de la particule II. Or, on a supposé qu'après leur rencontre initiale, les deux particules n'interagissent plus l'une avec l'autre. Ainsi, quoi que ce soit qui arrive à la particule I ne peut produire aucun changement réel sur la particule II. Il faut conclure que la réalité de la position ou de la vitesse de la particule II est

indépendante de la mesure qui est effectuée sur la particule I. Il faut conclure que la position et la vitesse de la particule II sont simultanément des éléments de la réalité indépendamment de la grandeur dynamique qui est mesurée sur la particule I – et cela, de surcroît, en absence de mesure effectuée sur la particule II !

On arrive ainsi à la conclusion que le réalisme s'applique à la particule II et que la description que la théorie quantique donne de son état est incomplète, seule l'une ou l'autre de sa position ou de sa vitesse pouvant être connue à la fois. En effet, la connaissance de la position ou de la vitesse de la particule II s'obtient à partir du résultat de la mesure effectuée sur la particule I. Or, en vertu de la relation de Heisenberg, la position et la vitesse de la particule I ne peuvent pas être mesurées simultanément, elles sont incompatibles. Par conséquent, la position et la vitesse de la particule II ne peuvent pas être calculées simultanément.

(e) La conclusion obtenue au sujet de la particule II contredit la prémisse de départ. L'argumentation présentée ici est un paradoxe, nommé « paradoxe EPR ». La contradiction résulte de la combinaison de la prémisse de départ, soit l'idée que la description quantique de la réalité est complète et qu'il faille renoncer au réalisme à l'échelle quantique de la réalité (le point de vue de l'interprétation de Copenhague), et du critère de réalité EPR. Or, les physiciens EPR jugent que leur critère de réalité est raisonnable. Par conséquent, le fait qu'on arrive à un paradoxe constitue la démonstration que la prémisse de départ est fausse.

(f) Or, les physiciens EPR prétendent avoir initialement fait la démonstration qu'il n'existe que deux points de vue alternatifs possibles pour interpréter la mécanique quantique, (1) l'interprétation statistique (ou d'ensemble), qui admet le réalisme à l'échelle quantique de la réalité mais force à conclure que la description quantique de la réalité est incomplète, et (2) l'interprétation de Copenhague, qui admet que la description quantique de la réalité est complète mais force à conclure qu'il faut renoncer au réalisme à l'échelle quantique de la réalité. Par conséquent, la fausseté du point de vue (2) implique la véracité du point de vue (1).

Les physiciens EPR concluent avoir réfuté l'interprétation de Copenhague et prouvé l'interprétation statistique (ou d'ensemble). La description quantique de la réalité est incomplète. La mécanique quantique n'est pas une théorie physique fondamentale ; il faut chercher une théorie à variables cachées. Les physiciens EPR prétendent avoir résolu la controverse Bohr-Einstein

### **13.4 Un principe quantique de non-localité ?**

Le paradoxe EPR résulte de la combinaison de l'interprétation de Copenhague et du critère de réalité EPR. Les physiciens EPR sont conscients que les tenants de l'interprétation de Copenhague, notamment Bohr, pourraient faire valoir que l'erreur ne réside pas dans l'interprétation de Copenhague mais dans ce critère de réalité. Les physiciens EPR prennent les devants et explorent cette possibilité dans leur article. Afin

d'éviter le paradoxe, ils proposent un critère de réalité alternatif, plus restrictif, qui peut s'énoncer comme suit :

deux grandeurs dynamiques (telles la position et la vitesse), ou plus, sont simultanément des éléments de la réalité seulement lorsqu'il est possible de les mesurer simultanément ou seulement lorsque la théorie peut prédire simultanément et avec certitude, c'est-à-dire avec une probabilité de 100 %, les valeurs numériques uniques par lesquelles elle doit les représenter, et cela, par des calculs seuls, sans que des mesures n'aient à être effectuées, sans perturber en aucune manière la particule.

La relation de Heisenberg interdit que la position et la vitesse de la particule I soient mesurées simultanément. Or, la théorie ne peut prédire la position ou la vitesse de la particule II par un calcul seul, sans qu'aucune mesure ne soit effectuée sur celle-ci, qu'à partir du résultat de la mesure effectuée sur la particule I, la précision du calcul dépendant de la précision de la mesure. Par conséquent, la théorie ne peut pas prédire simultanément, par des calculs seuls, les valeurs numériques uniques par lesquelles elle doit représenter la position et la vitesse de la particule II. En vertu du critère de réalité alternatif, on doit conclure que la position et la vitesse de la particule II ne peuvent pas être simultanément des éléments de la réalité.

La conclusion alternative à laquelle on arrive ainsi est conforme à la prémisse de départ. Le réalisme ne s'applique pas à la particule II : le fait que ce soit sa position ou sa vitesse qui puisse être représentée par une valeur numérique unique et qui soit ainsi, en vertu du critère de réalité alternatif, un élément de la réalité dépend d'un acte de mesure, effectué dans ce cas-ci sur une autre particule. La description quantique de l'état de la particule II est complète : chaque élément de la réalité (la position ou la vitesse de la particule II) est représenté par un élément correspondant de la théorie (par une valeur numérique unique, dont la connaissance est limitée par la précision de la mesure à partir de laquelle elle est calculée). Ensemble, l'interprétation de Copenhague et le critère de réalité alternatif ne mènent à aucun paradoxe dans le cas de particules intriquées. L'interprétation de Copenhague est sauvée.

Cependant, cette conclusion alternative pose problème : le fait que la position ou la vitesse de la particule II soit réelle dépend d'un acte de mesure effectué sur la particule I. Aucune action n'a été entreprise sur la particule II. Pourtant, on a supposé qu'après leur rencontre initiale, les deux particules n'interagissent plus l'une avec l'autre : quoi que ce soit qui arrive à la particule I ne peut produire aucun changement réel sur la particule II. La conclusion alternative contredit cette supposition et implique qu'après leur rencontre initiale, les deux particules continuent de s'influencer l'une l'autre de manière instantanée et indépendante de leur éloignement dans l'espace, de sorte que l'acte de mesure effectuée seulement sur la particule I donne réalité à la grandeur dynamique mesurée (la position ou la vitesse) simultanément pour les deux particules (cette grandeur dynamique est définie pour les deux particules de manière acausale, aléatoire, simultanée et corrélée), et cela, indépendamment de la distance qui sépare les deux particules à ce moment ! Cette distance peut être arbitrairement grande ; elle pourrait se chiffrer en années-lumière !

Les physiciens EPR ont ainsi fait la démonstration que le prix à payer pour sauver l'interprétation de Copenhague du paradoxe dans le cas de particules intriquées est d'interpréter l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication comme « action fantôme à distance » entre particules, pour reprendre les mots d'Einstein. Comme si une influence physique se propageait instantanément entre deux particules, à une vitesse infinie ! Il faudrait, à l'échelle quantique de la réalité, ajouter au principe classique de localité (voir la section 6.2) un principe quantique de non-localité, pouvant s'énoncer ainsi :

à l'échelle quantique de la réalité, dans les situations impliquant des particules intriquées, une cause peut produire un effet instantané en un lieu distant, indépendamment de la distance qui sépare le lieu de la cause et le lieu de l'effet.

Comme si une bombe explosant ici pouvait faire éclater instantanément, sans délai, une fenêtre située là-bas (par exemple à 20 mètres de distance) ; comme si le souffle de l'explosion se propageait instantanément d'ici à là-bas, à une vitesse infinie !

En même temps qu'ils aient été les premiers à exposer l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication dans leur article de 1935, les physiciens EPR ont aussi été les premiers à indiquer que celui-ci peut être interprété comme une influence instantanée à distance maintenue entre des particules. Pour cette raison, ce qu'Einstein qualifie d'« action fantôme à distance » est aussi nommé « effet EPR ». Selon cette interprétation de l'intrication, la première interaction entre l'une ou l'autre de deux particules intriquées et l'environnement produira des effets simultanés et corrélés sur les deux particules, indépendamment de leur éloignement dans l'espace à ce moment. Deux particules intriquées sont physiquement inséparables.

Les physiciens EPR jugent qu'aucune définition raisonnable de la réalité ne peut permettre l'existence d'influences instantanées à distance. Les physiciens EPR jugent que la conclusion alternative, fondée sur le critère de réalité alternatif, n'est pas recevable et que la conclusion initiale, fondée sur le critère de réalité EPR, est confirmée.

### **13.5 La réponse de Bohr au paradoxe EPR**

La même année, en 1935, Bohr publie sa réplique au paradoxe EPR dans un article portant aussi le titre « La description quantique de la réalité physique peut-elle être considérée complète ? » Sa réponse est « oui ». Le paradoxe EPR résulte de la combinaison de l'interprétation de Copenhague et du critère de réalité EPR. Comme les physiciens EPR l'avaient anticipé, Bohr fait valoir que l'erreur ne réside pas dans l'interprétation de Copenhague mais dans ce critère de réalité.

Bohr affirme que le critère de réalité EPR contient une ambiguïté fondamentale en ce qu'il énonce qu'une grandeur dynamique peut être un élément de la réalité « sans qu'une mesure n'ait à être effectuée, sans perturber en aucune manière la particule ». Le critère de réalité EPR n'est en fait rien d'autre qu'un énoncé du principe du réalisme. Or, Bohr

considère avoir déjà fait la démonstration, sur la base du quantum d'action et du positivisme, que le principe du réalisme est fondamentalement inadéquat pour donner une signification à la mécanique quantique (voir les sections 8.1 à 8.3). Selon lui, le paradoxe EPR en constitue une preuve supplémentaire.

D'ailleurs, le critère de réalité alternatif est compatible à la fois avec le principe de complémentarité et avec celui du réalisme. Or, en raisonnant sur la base de l'interprétation de Copenhague et de ce critère de réalité alternatif, il n'y a plus de paradoxe dans le cas de particules intriquées. Cela n'est-il pas la preuve que l'erreur réside dans le critère de réalité EPR et non dans l'interprétation de Copenhague ?

Selon Bohr, la conclusion à tirer du paradoxe EPR est l'exact contraire de celle à laquelle arrivent les physiciens EPR : l'interprétation statistique (ou d'ensemble) est réfutée et l'interprétation de Copenhague prouvée. La description quantique de la réalité est complète. La mécanique quantique est une théorie physique fondamentale. Bohr prétend à son tour avoir résolu la controverse Bohr-Einstein. Malheureusement, Bohr ne dira jamais clairement s'il admet le principe quantique de non-localité, qui est la signification que l'interprétation de Copenhague attribue implicitement à l'élément de la théorie qu'est l'intrication.

### **13.6 Conclusion**

Les deux articles publiés en 1935, respectivement par les physiciens EPR et par Bohr, constituent le point culminant de la controverse Bohr-Einstein, qui débuta en 1920. Ces deux articles marquent la fin des débats. Par la suite, Bohr et Einstein demeureront chacun sur leurs positions respectives. La controverse Bohr-Einstein demeure non résolue en 2009, bien qu'une découverte scientifique majeure lui ait donné depuis un nouvel éclairage...

## Chapitre 14

### Le théorème de Bell et les expériences d'Aspect

... ou la preuve scientifique de la réalité des influences instantanées à distance entre particules ? Quittons pour un moment le domaine de la philosophie pour faire un retour à celui de la science. L'intrication et son interprétation comme un principe quantique de non-localité, tous deux mis à jour par les physiciens EPR dans leur article de 1935, ont suscité l'intérêt d'autres physiciens dans les décennies qui suivirent. Ceux-ci les étudièrent dans le cadre du formalisme mathématique et de l'expérimentation, donc dans le cadre de la science.

#### 14.1 Le théorème de Bell

En 1964, le physicien John Bell publie un théorème (scientifique) qui fait la démonstration que toute éventuelle théorie à variables cachées qui se fonderait sur le principe de localité ne peut pas reproduire, dans le cas de particules intriquées, toutes les prédictions tirées de la mécanique quantique.

Bell d'abord, d'autres physiciens ensuite, démontrent que les prédictions, concernant des particules intriquées, tirées de toute éventuelle théorie à variables cachées qui se fonderait sur le principe de localité doivent, en conséquence de ce principe, respecter certaines inégalités mathématiques nommées « inégalités de Bell ». D'autre part, Bell et ces autres physiciens démontrent que les prédictions, concernant les mêmes particules intriquées, tirées de la mécanique quantique violent ces inégalités de différentes manières bien spécifiques.

Le théorème de Bell démontre ainsi que ce n'est pas seulement l'interprétation de Copenhague (qui relève de la philosophie) qui implique de manière implicite que l'élément de la théorie qu'est l'intrication doit être interprété comme un principe de non-localité : la mécanique quantique elle-même (la science) le fait aussi ! (Pour être rigoureux, comme nous le verrons à la section 15.7, le théorème de Bell démontre que soit la mécanique quantique viole le principe de localité, soit elle implique l'existence d'univers parallèles. Notons que l'idée d'univers parallèles est indépendante de l'intrication : elle n'est pas une autre signification possible donnée à cet élément de la théorie. Nous expliquerons l'origine de cette idée au chapitre 15.)

Voilà un critère mathématique pouvant être soumis à l'expérience, donc un critère scientifique, qui doit permettre de déterminer si l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication doit être interprété comme une limite à « ce que les humains connaissent de la réalité » (comme un symptôme du caractère incomplet de la description quantique de la réalité) ou comme la représentation de « ce que la réalité est et fait » (comme l'existence d'influences instantanées à distance entre particules – ou comme la non-existence de telles influences mais l'existence d'univers parallèles).

## 14.2 Les expériences d'Aspect

En 1964, le théorème de Bell a ainsi ouvert la porte à de nouvelles expériences de physique quantique, encore jamais réalisées. Il faudra attendre 1972 pour que le développement de la technologie permette la réalisation des premières expériences sur des particules intriquées. Pendant une décennie, les résultats obtenus seront non concluants en raison des marges d'incertitude élevées. Mais la quasi-totalité des résultats obtenus pointeront dans la même direction : les inégalités de Bell sont violées, et cela, selon les différentes manières prédites par la mécanique quantique. En 1981-82, Alain Aspect et son équipe réalisent les premières expériences donnant des résultats concluants. La preuve est faite : les influences instantanées à distance entre particules ont bel et bien été observées, elles sont réelles (ou sinon, il existe une multiplicité foisonnante d'univers parallèles) ! Ensemble, le théorème de Bell et les expériences d'Aspect constituent la preuve scientifique du principe quantique de non-localité (ou de l'existence d'univers parallèles). L'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication a mené à une découverte scientifique extraordinaire ! Malheureusement, les physiciens ne savent pas encore laquelle... Les expériences réalisées depuis confirment les résultats obtenus par Aspect.

## 14.3 La preuve scientifique de l'interprétation de Copenhague ?

Revenons au paradoxe EPR et à la réponse de Bohr à celui-ci. Certains pensent que le théorème de Bell et les expériences d'Aspect constituent la preuve – scientifique et non philosophique – de l'interprétation de Copenhague et la réfutation – scientifique et non philosophique – de l'interprétation statistique (ou d'ensemble). En 1982, le théorème de Bell et les expériences d'Aspect auraient-ils résolu la controverse Bohr-Einstein ?

La réponse est non. Le théorème de Bell et les expériences d'Aspect ont jeté un nouvel éclairage – scientifique et non philosophique – sur la controverse Bohr-Einstein en faisant la preuve de la réalité des influences non-locales entre particules (ou de l'existence d'univers parallèles), mais demeurent muets sur le noeud de cette controverse, à savoir l'applicabilité ou non du principe du réalisme à l'échelle quantique de la réalité et le caractère incomplet ou complet de la description quantique de la réalité.

Expliquons-nous. Le paradoxe EPR est en réalité le résultat de la combinaison de trois prémisses : (a) l'interprétation de Copenhague, la prémisse de départ, qui admet que la description quantique de la réalité est complète et force à renoncer au réalisme à l'échelle quantique de la réalité ; (b) le critère de réalité EPR, qui constitue un énoncé du principe du réalisme (voir la section 13.5) ; (c) l'idée qu'après leur rencontre initiale, les deux particules intriquées, éloignées l'une de l'autre dans l'espace, n'interagissent plus. La troisième prémisse constitue un énoncé du principe de localité, appliqué au cas des particules intriquées.

Selon les physiciens EPR, l'erreur qui mène au paradoxe EPR réside dans la prémisse (a). Selon Bohr, elle réside dans la prémisse (b). D'ailleurs, si l'on remplace le critère de réalité EPR par le critère de réalité alternatif, compatible à la fois avec le principe de

complémentarité et avec celui du réalisme, il n'y a plus de paradoxe. Selon le théorème de Bell et les expériences d'Aspect, l'erreur réside d'abord et avant tout ailleurs, dans la prémisse (c), dans le principe de localité appliqué au cas des particules intriquées (ou sinon dans la supposition implicite qu'il n'existe qu'une seule réalité classique). Le théorème de Bell et les expériences d'Aspect ne nous donnent aucune information sur les prémisses (a) et (b), ils ne résolvent pas la controverse Bohr-Einstein.

Oui, mais... Les physiciens EPR ont démontré qu'ensemble, le maintien de la prémisse (a), l'interprétation de Copenhague, et le rejet de la prémisse (b), soit le rejet du critère de réalité EPR et son remplacement par le critère de réalité alternatif, impliquaient automatiquement le rejet de la prémisse (c), soit le rejet du principe de localité appliqué au cas des particules intriquées (l'idée d'univers parallèles n'existait pas en 1935 ; elle naîtra en 1957). Autrement dit : « si la complémentarité, alors la non-localité ». Si la preuve de la non-localité dans le cas des particules intriquées a été faite, cela ne constitue-t-il pas automatiquement la preuve de la complémentarité et la réfutation du réalisme ?

Cela serait le cas si le raisonnement suivant était vrai : « si le réalisme, alors la localité ». Mais ce raisonnement est faux. Il n'y a pas incompatibilité, voire contradiction, entre le réalisme et la non-localité. Le raisonnement juste est ainsi : « si le réalisme, alors la localité ou la non-localité ». Le raisonnement inversé suivant est donc faux : « si la non-localité, alors la complémentarité ». Le raisonnement inversé juste est plutôt : « si la non-localité, alors la complémentarité ou le réalisme ». Par ailleurs, le raisonnement inversé suivant est vrai : « si la localité, alors le réalisme ». Ainsi, si la preuve de la non-localité a été faite, cela ne résout pas la controverse Bohr-Einstein.

#### **14.4 La preuve scientifique des interprétations irrationnelles ?**

Des tenants des interprétations paradoxaliste, subjectiviste et de l'influence de la conscience soutiennent que le théorème de Bell et les expériences d'Aspect constituent la preuve scientifique de ces interprétations. Comment en arrivent-ils à une cette conclusion ? Leur argumentation est fondée sur deux erreurs. La première est de considérer que le théorème de Bell et les expériences d'Aspect constituent la preuve scientifique de l'interprétation de Copenhague et la réfutation scientifique de l'interprétation statistique (ou d'ensemble), donc qu'ils résolvent la controverse Bohr-Einstein. La deuxième est de considérer que l'interprétation de Copenhague implique ces interprétations irrationnelles.

## Chapitre 15

### L'interprétation des univers parallèles

En 1957, le physicien Hugh Everett III présente une nouvelle interprétation de la mécanique quantique qu'il nomme la « théorie de la fonction d'onde universelle ». Ce n'est toutefois qu'à partir de 1970 que l'interprétation d'Everett deviendra connue, grâce aux travaux de diffusion du physicien Bryce DeWitt, qui la renomma « l'interprétation des mondes multiples ». L'interprétation d'Everett est aujourd'hui également connue sous l'appellation d'« interprétation des univers parallèles ».

L'interprétation des univers parallèles présente trois caractéristiques principales. (1) Tout d'abord, elle admet la validité à l'échelle quantique de la réalité de six des sept principes classiques, soit les principes d'objectivité, du réalisme, de l'espace-temps, de la causalité, du déterminisme et de la localité – tout en étant compatible, dans ce dernier cas, avec le théorème de Bell qui viendra en 1964 et les expériences d'Aspect qui viendront en 1981-82 (voir la section 15.7). Seul le principe classique du tiers exclu expérimental ne s'applique pas à l'échelle quantique de la réalité, devant être remplacé par le principe quantique de la dualité onde-corpuscule. (2) L'interprétation des univers parallèles suppose ensuite que la description quantique de la réalité est complète – et cela, malgré la preuve que les physiciens EPR prétendent avoir faite, sur la base de la relation de Heisenberg, de l'incompatibilité de cette idée avec le principe du réalisme. Nous verrons comment une telle conciliation est possible dans la section 15.2. (3) Enfin, contrairement aux interprétations discutées dans les chapitres précédents, l'interprétation des univers parallèles se fonde explicitement sur la théorie de la décohérence, à laquelle elle donne d'ailleurs une signification spectaculaire. Rappelons que la théorie de la décohérence fut proposée pour la première fois en 1952 par David Bohm dans le cadre de sa théorie à variables cachées non-locales. C'est seulement à partir de 1981 que la théorie de la décohérence commencera à être véritablement développée ; ces développements ultérieurs demeurent totalement compatibles avec la signification qu'Everett a donnée à cette théorie en 1957.

#### 15.1 La fonction d'onde universelle

La physique quantique est considérée universelle et la physique classique un cas particulier ou limite de celle-ci. L'échelle quantique de la réalité correspond à la réalité dans sa totalité et l'échelle classique en est un sous-domaine. Tout objet doit être représenté, dans la théorie, par une fonction d'onde (et par une fonction de spin dans le cas des particules et systèmes quantiques). Puisque tout paquet d'ondes s'étend jusqu'à l'infini, tous les paquets d'ondes représentant tous les objets, quantiques et classiques, de l'Univers se superposent : ils se chevauchent, perdent leur individualité et fusionnent en un unique paquet d'ondes résultant. L'intrication est universelle : tous les objets de l'Univers sont intriqués et constituent un système quantique unique, l'Univers, qui doit être représenté par une fonction d'onde unique, la fonction d'onde universelle – comme si tous les objets de l'Univers étaient physiquement inséparables. (Notons qu'une telle fonction d'onde universelle n'a jamais encore été écrite.)

## 15.2 Le rapport entre théorie et réalité

Contrairement à Bohr et à Einstein, Everett considère que toute fonction d'onde, notamment la fonction d'onde universelle, représente littéralement « ce que la réalité est et fait ». Toutes les valeurs propres que la théorie attribue simultanément à une grandeur dynamique donnée correspondent toujours à des éléments de la réalité, indépendamment qu'il y ait eu réduction, naturelle ou artificielle, selon cette grandeur dynamique ou non. Tous les états propres de toutes les grandeurs dynamiques qui sont présents dans un même état superposé sont simultanément réels.

## 15.3 Réalisme, espace-temps et description complète

L'Univers, aux échelles quantique et classique, est soumis au principe du réalisme. De plus, tout objet situé dans l'Univers, qu'il s'agisse d'une particule, d'un corps ou d'un système, est toujours présent dans l'espace-temps.

La fonction d'onde universelle contient la totalité de l'information sur l'Univers (la grandeur dynamique de spin mise à part) : la description quantique de la réalité est complète. Chaque élément de la réalité est en tout temps représenté par un élément correspondant de la théorie (par une partie de la fonction d'onde universelle ; par l'une des valeurs propres attribuées simultanément à une grandeur dynamique).

Comment Everett réussit-il à concilier le principe du réalisme et l'idée que la description quantique de la réalité est complète ? D'une part, Bohr et Einstein considéraient que les seuls éléments de la théorie à correspondre à des éléments de la réalité sont les ensembles réduits de valeurs propres. Or, la relation de Heisenberg interdit la réduction simultanée des ensembles de valeurs propres attribuées à la position et à la vitesse au-delà de la limite qu'elle spécifie. Par conséquent (voir la section 13.1), ou bien (1) la position et la vitesse d'une particule sont simultanément des éléments de la réalité, indépendamment qu'elles soient mesurées ou non (le réalisme s'applique à l'échelle quantique), et alors la description quantique de l'état d'une particule est incomplète, ou bien (2) la théorie quantique donne une description complète de l'état d'une particule et alors la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être simultanément des éléments de la réalité, seule celle qui est mesurée est un élément de la réalité (le réalisme ne s'applique pas à l'échelle quantique). D'autre part, Everett considère que tout ensemble de valeurs propres, réduit ou non, représente, tel quel, un ou des élément(s) de la réalité. Il ne se bute donc pas contre la relation de Heisenberg et peut ainsi concilier tout naturellement le principe du réalisme et l'idée du caractère complet de la description quantique de la réalité.

## 15.4 Les éléments de la réalité

Les éléments de la réalité doivent être trouvés par un appel aux résultats de mesures, d'observations et d'expériences. Or, le concept théorique de fonction d'onde rend compte de tous ces résultats. Par conséquent, si l'on considère que toute fonction d'onde

représente littéralement « ce que la réalité est et fait », on peut identifier les éléments de la réalité à partir de ce concept théorique.

Si une fonction d'onde représente littéralement « ce que la réalité est et fait », alors, à chaque instant qui passe, tout point matériel (qu'il s'agisse du centre de masse d'un corps ou d'une particule assimilée à un objet ponctuel), d'une part, occupe simultanément une multiplicité continue de points d'espace et, d'autre part, suit simultanément une multiplicité continue de mouvements, c'est-à-dire se meut simultanément selon une multiplicité continue de vitesses et dans une multiplicité continue de directions. Dans le cas d'une particule, on ajoute qu'elle possède simultanément une multiplicité discontinue de spins.

L'Univers, en tant que système quantique intriqué ultime et unique, se trouve toujours dans un état superposé global et cet état est bel et bien réel, tel quel. Chaque particule, chaque corps et chaque système constituent un sous-système quantique de l'Univers. L'état superposé d'une particule, assimilée à un objet ponctuel, ou du centre de masse d'un corps constitue un sous-état de l'état superposé global de l'Univers.

### **15.5 Une multiplicité foisonnante d'univers parallèles**

Conformément à la théorie de la décohérence, Everett traite sur un pied d'égalité les décohérences naturelles et artificielles, toutes causées par les interactions entre un objet quantique (qu'il s'agisse d'un objet naturel ou d'un dispositif expérimental dans lequel une particule est observée par des instruments) et son environnement.

La décohérence désigne la transformation de l'état superposé d'un objet quantique en un mélange statistique d'états réduits selon certaines grandeurs dynamiques pour le système quantique intriqué « objet quantique – environnement » (voir les sections 5.2 et 5.3).

Reprenons l'exemple du dé quantique de la section 5.2. Un état superposé est représenté par le vecteur d'état suivant :

$$|1\rangle \text{ ET } |2\rangle \text{ ET } |3\rangle \text{ ET } |4\rangle \text{ ET } |5\rangle \text{ ET } |6\rangle.$$

Un mélange statistique d'états réduits est plutôt représenté comme suit :

$$|1\rangle \text{ OU } |2\rangle \text{ OU } |3\rangle \text{ OU } |4\rangle \text{ OU } |5\rangle \text{ OU } |6\rangle.$$

Un seul des états réduits du mélange statistique serait réel. La théorie de la décohérence, dans son état actuel, laisse sans réponse deux questions fondamentales : elle ne peut prédire lequel des états réduits du mélange statistique serait réel ni dire ce qu'il adviendrait des autres états réduits.

Everett, quant à lui, donne une signification tout autre aux mélanges statistiques d'états... Voici la signification spectaculaire qu'Everett donne à la théorie de la décohérence.

Selon Everett, tous les états propres de toutes les grandeurs dynamiques qui sont présents dans un même état superposé, en tant que sous-état de l'état superposé global de l'Univers, sont simultanément réels. Par conséquent, les effets d'interférence qui existent entre les états propres de chacune des grandeurs dynamiques (et qui sont représentés, dans la théorie, par les termes mathématiques nommés « cohérences ») sont également réels. Les états propres de chacune des grandeurs dynamiques coexistent réellement et sont physiquement interdépendants.

Le fait qu'un état superposé soit transformé en un mélange statistique d'états réduits selon certaines grandeurs dynamiques (cette transformation étant représentée, dans la théorie, par la décohérence, par la destruction des cohérences) ne change rien à la réalité des états propres des grandeurs dynamiques : tous les états réduits (selon certaines grandeurs dynamiques) qui sont présents dans un même mélange statistique demeurent simultanément réels. Selon Everett, rien de tel qu'une réduction non unitaire ne se déroule jamais dans la réalité. Un état superposé n'est jamais transformé en un état réduit *unique*, au hasard. Un état superposé sera transformé en un mélange statistique de tous les états réduits possibles. Dans la réalité, il n'y a aucun hasard. Everett rend ainsi sans objet les deux questions fondamentales laissées sans réponse par la théorie de la décohérence.

Mais dans un mélange statistique d'états réduits (selon certaines grandeurs dynamiques), il n'y a pas d'effets d'interférence entre les états réduits (les cohérences entre ceux-ci sont nulles – ou du moins tendent vers zéro). Par conséquent, le processus de destruction des effets d'interférence (la décohérence) entre les états propres (des grandeurs dynamiques selon lesquelles il y a réduction) est réel. Les états réduits (selon certaines grandeurs dynamiques) qui sont présents simultanément dans un même mélange statistique sont devenus physiquement indépendants les uns des autres ; ils ne coexistent plus. Chacun est devenu par lui-même un sous-état de l'état superposé global de l'Univers. Qu'est-ce que cela signifie ?

Selon Everett, le processus de destruction des effets d'interférence (la décohérence) entre les états propres des grandeurs dynamiques sélectionnées signifie la séparation de l'Univers en autant de branches parallèles qu'il y a d'états réduits dans le mélange statistique final. Cette séparation de l'Univers se produit au niveau du sous-système quantique constitué d'un objet quantique (naturel ou artificiel) et de son environnement. Les branches multiples qui se développent ainsi à partir d'une branche commune initiale sont physiquement indépendantes. Elles constituent autant de réalités classiques parallèles.

Les états propres (de chacune des grandeurs dynamiques) qui sont présents dans un même état superposé interfèrent les uns avec les autres et coexistent dans une même branche de l'Univers. Ils constituent un tout physique unique. Ils évoluent dans le temps conjointement et de manière indissociable. Après la destruction des effets d'interférence, les états réduits qui sont présents dans le mélange statistique, en lequel s'est transformé l'état superposé initial, se retrouvent dans différentes branches parallèles de l'Univers. Chacune de ces branches contient un état réduit unique. Ces états réduits ne coexistent plus, ils sont devenus physiquement indépendants les uns des autres. Chaque état réduit

suit dès lors sa propre évolution dans le temps, de manière indépendante de l'évolution des autres états réduits.

Toutes les possibilités quantiques sont réelles et engendrent une multiplicité foisonnante de réalités classiques parallèles. Chaque branche est nommée un « univers » (avec une minuscule) ou un « monde » ; la réalité dans sa totalité est nommée « l'Univers » (avec une majuscule) ou le « Multivers ».

Selon Everett, la réduction non unitaire (aléatoire) n'est rien de plus qu'une illusion créée par l'indépendance physique des multiples réalités classiques parallèles. Selon Everett, l'interprétation des univers parallèles est ce que devient la théorie quantique (la science) si on lui *retire* le postulat de réduction. La règle de probabilité (de Born) est conservée pour calculer le nombre d'univers parallèles qui croissent à partir d'un univers commun initial lors d'une décohérence et la répartition des états réduits dans ceux-ci – puisque cette règle n'implique pas de hasard réel, il faudrait la renommer la « règle de proportion (de Born) ».

Dans la nature, tout objet naturel interagit avec d'autres objets naturels de son environnement. La destruction d'effets d'interférence existant à l'intérieur d'un état superposé est un processus normal et continu dans l'évolution de tout objet naturel. Le Multivers est à l'image d'un arbre unique dont les branches prolifèrent continuellement. Le nombre d'univers parallèles est infini. La séparation d'une branche unique du Multivers en une multiplicité de branches parallèles est la signification ultime qu'Everett donne à l'effet de l'environnement en mécanique quantique, l'effet de l'observateur en constituant un cas particulier.

Einstein avait reproché à l'interprétation de Copenhague le fait qu'elle permette à une souris de causer, par son acte d'observation, la réduction de l'état superposé de l'Univers. Everett répond que c'est plutôt l'Univers qui sépare la souris qui l'observe en une multiplicité foisonnante de copies.

## **15.6 Causalité et déterminisme**

La théorie de la décohérence joue un rôle unificateur à l'intérieur de la théorie quantique. Elle implique que l'état d'un objet quantique suit en tout temps un seul et même type d'évolution, unitaire, indépendamment que l'objet quantique soit « observé » ou non. Les principes de causalité et du déterminisme s'appliquent au Multivers dans sa globalité, autant à l'échelle quantique que classique.

Tous les événements possibles, quantiques et classiques, naturels et artificiels, se réalisent dans le Multivers. Toutes les histoires possibles se déroulent dans autant d'univers parallèles. Chaque copie de chaque être conscient ne peut percevoir que la branche du Multivers qu'elle occupe, vivant dans l'illusion que cette branche est la totalité de la réalité, vivant dans l'illusion que l'histoire de l'Univers est unique et contingente (car partiellement aléatoire dans son unicité) alors qu'elle est en réalité multiple et nécessaire (car totalement déterminée dans sa multiplicité). Le Multivers est à l'image d'un arbre

unique dont les branches, en nombre infini, prolifèrent continuellement. Chaque chemin menant de la base de l'arbre jusqu'à l'extrémité d'une branche constitue l'histoire d'un monde, d'un univers.

### **15.7 La localité**

L'interprétation des univers parallèles de 1957 donne au formalisme mathématique de la mécanique quantique une signification totalement conforme au principe classique de localité, et cela, sans être contredite par le théorème de Bell qui viendra en 1964 ni par les expériences d'Aspect qui viendront en 1981-82. Comment est-ce possible ?

Selon le physicien John G. Cramer, en 1986, puis le physicien David Z. Albert, en 1994, le théorème de Bell démontre en réalité que si les inégalités de Bell sont violées par les résultats expérimentaux, alors soit (1) tout acte d'observation possible doit nécessairement donner un résultat unique et alors l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication doit être interprété comme un principe de non-localité, soit (2) l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication doit être interprété conformément au principe de localité, mais alors un acte d'observation ne donne pas nécessairement un résultat unique.

Or, selon l'interprétation des univers parallèles, tout acte d'observation donne tous les résultats possibles, mais dans des branches parallèles et non-communicantes de l'Univers. Le système « dispositif expérimental – environnement » est séparé en autant de copies physiquement indépendantes qu'il y a de résultats possibles. Dans chaque branche individuelle de l'Univers, on retrouve une copie du système « dispositif expérimental – environnement » dans un état unique. Par conséquent, dans le cadre de l'interprétation des univers parallèles, la violation des inégalités de Bell par les résultats expérimentaux d'Aspect mène à la conclusion (2) : l'élément de la théorie quantique qu'est l'intrication doit être interprété conformément au principe de localité... et il existe une multiplicité foisonnante d'univers parallèles.

La séparation d'une branche de l'Univers en une multiplicité de branches parallèles est un processus local. Il commence sur le lieu où se produit la destruction d'effets d'interférence dans un état superposé, selon certaines grandeurs dynamiques, pour ensuite se propager au reste de l'Univers localement, de point en point dans l'espace, à une vitesse toujours inférieure ou égale à celle de la lumière dans le vide.

### **15.8 Conclusion**

Après l'interprétation statistique (ou d'ensemble), l'interprétation des univers parallèles est un second point de vue mis en opposition avec l'interprétation de Copenhague, cette dernière étant qualifiée d'interprétation orthodoxe ou standard (ou, par extension, avec l'interprétation existentielle). D'une part, l'interprétation statistique (ou d'ensemble) et l'interprétation de Copenhague sont en quelque sorte l'antithèse l'une de l'autre au sujet de l'opposition entre l'applicabilité ou non du réalisme à l'échelle quantique de la réalité et le caractère incomplet ou complet de la description quantique de la réalité. Cette opposition découle de la combinaison de la supposition philosophique selon laquelle

seuls les états réduits sont des éléments de la réalité, pas les états superposés, et de la relation de Heisenberg. D'autre part, l'interprétation des univers parallèles et l'interprétation de Copenhague sont en quelque sorte l'antithèse l'une de l'autre au sujet de la réalité ou de la non-réalité des états superposés.

## **Chapitre 16**

### **La position instrumentaliste**

« Tais-toi et calcule ! » Cette maxime du physicien David Mermin résume bien la position instrumentaliste. Il ne s'agit pas d'une autre interprétation philosophique de la mécanique quantique, mais plutôt du refus explicite de chercher une interprétation. Selon ce point de vue, le seul rôle de la science est de s'assurer de la cohérence des théories et de la concordance de leurs prédictions avec les données.

## Conclusion

Pour comprendre le sujet fascinant et complexe qu'est la mécanique quantique, il est impératif de distinguer la science et la philosophie. Il existe une multiplicité foisonnante d'interprétations philosophiques de la mécanique quantique, certaines sensées et d'autres extravagantes, incompatibles entre elles, pouvant chacune se présenter en plusieurs variantes et entre lesquelles il est toujours impossible de trancher en ce début de 21<sup>e</sup> siècle. Ajoutons que chaque individu qui a contribué aux interprétations philosophiques de la mécanique quantique et aux débats les opposant a pu changer de point de vue à plusieurs reprises tout au long de sa vie. Au-delà de la multiplicité foisonnante des interprétations philosophiques et de leurs variantes, il existe une seule et unique mécanique quantique, une seule et unique science, à laquelle toutes ces interprétations philosophiques se rapportent.

De tout temps, l'interprétation de Copenhague a été la plus populaire : on la qualifie d'interprétation orthodoxe ou standard. Elle est si populaire qu'elle est presque systématiquement confondue avec la mécanique quantique elle-même (la science), comme si toutes deux étaient une seule et même chose. Cette confusion est omniprésente chez les gourous du Nouvel-Âge et les philosophes, mais également chez les journalistes scientifiques et les physiciens eux-mêmes. L'interprétation de Copenhague est par ailleurs la source des interprétations extravagantes de la mécanique quantique, qui en sont des détournements vers l'irrationnel et même le surnaturel : ainsi, ceux qui professent des conceptions irrationnelles de la réalité invoquent la mécanique quantique elle-même (la science) comme fondement, justification ou preuve scientifique de telles conceptions. L'interprétation de Copenhague n'a cependant jamais fait l'unanimité. Elle a de plus été réfutée par l'expérience de pensée du chat de Schrödinger. Par ailleurs, il en existe une version « revue et corrigée » par la théorie de la décohérence, l'interprétation existentielle, qui est toujours en course.

Bien que la mécanique quantique n'ait pas fait entrer dans le domaine de la science l'espoir ancien d'une réalité matérielle subordonnée à une réalité spirituelle supérieure et bien que la conception de la réalité que la mécanique quantique implique ne soit pas encore élucidée, une chose est certaine : la mécanique quantique nous dévoile une réalité matérielle cohérente (non-contradictoire) et objective (indépendante de l'esprit) qui est incommensurablement plus extraordinaire et contre-intuitive que toutes les conceptions irrationnelles de la réalité jamais développées par les humains. Les futures découvertes en physique promettent d'être excitantes ! Entre autres, souhaitons que les physiciens découvrent un jour si, en 1982, ils ont prouvé l'existence d'influences instantanées à distance entre particules ou s'ils ont prouvé que nous vivons dans un Multivers composé d'une multiplicité foisonnante d'univers parallèles.

## Biographie

Daniel Fortier enseigne la physique et l'astronomie au Collège Lionel-Groulx (Sainte-Thérèse, Québec, Canada) depuis 1999. Il a notamment créé un cours d'astrophysique, dans lequel il inclut un enseignement essentiellement qualitatif des théories de la relativité restreinte et générale, ainsi qu'un cours sur l'histoire de l'astronomie. Il a également enseigné au Collège Ahuntsic (Montréal, Québec, Canada) et été animateur au Planétarium de Montréal (Montréal, Québec, Canada). Il détient une maîtrise en astronomie de l'Université de Toronto (Toronto, Ontario, Canada) et un baccalauréat en physique de l'Université de Montréal (Montréal, Québec, Canada).

Il travaille actuellement sur un projet de livre traitant de la science et de la philosophie de la mécanique quantique et destiné au grand public. Le présent texte en est une version abrégée. Daniel Fortier a rédigé un site Internet sur la démarche scientifique : « Entre l'humain et la réalité. Comment distinguer le vrai du faux ? » (2002, <http://mapage.clg.qc.ca/danielfortier/>) Il a publié de nombreux textes : (1) dans la revue Le Québec Sceptique et sur le site Internet des Sceptiques du Québec (2003-2009) ; (2) dans le recueil « Les couleurs de l'humanisme » de l'Association Humaniste du Québec (L'incrédule, Montréal, 2008) ; (3) sur le site Internet Libre Pensée (2006-2007). Il a aussi été interviewé, à titre de physicien, dans l'ouvrage de démystification « Enquête sur le Secret » de Jean-Charles Condo et Natacha Condo-Dinucci (Amérik Média, Montréal, 2008). Ce livre expose les erreurs scientifiques du film et du livre « Le Secret » de Rhonda Byrne.

Daniel Fortier a été un chroniqueur scientifique apparaissant dans la série télévisée « Chasseur de mystères » (canal Historia, 2007), y démystifiant cinq mystères reliés à l'histoire du Québec. Il a donné des conférences sur la science et sa philosophie devant des auditoires variés tels que les Sceptiques du Québec, la société Mensa de Montréal et les étudiants du Collège Lionel-Groulx.

Daniel Fortier est passionné par la science, autant par sa philosophie que par ses théories. Il est animé du désir de partager ce sujet riche et fascinant avec un auditoire général.

# Références

## Livres

BÉLANGER, Marco. *Le flou dans la bergerie (Essai sur la lucidité et l'incertitude)*, Liber, Montréal, 2002.

BLACKBURN, Pierre. *Logique de l'argumentation*, 2<sup>e</sup> édition, ERPI, Montréal, 1994.

BLACKBURN, Pierre. *Connaissance et argumentation*, ERPI, Montréal, 1992.

BUNGE, Mario. *Matérialisme et humanisme : pour surmonter la crise de la pensée*, Liber, Montréal, 2004.

CARATINI, Roger. *Initiation à la philosophie*, L'Archipel, Paris, 2000.

COHEN-TANNOUDJI, Claude, Bernard DIU et Franck LALOË. *Mécanique quantique I*, Hermann, Collection Enseignement des sciences, Paris, 1990.

COHEN-TANNOUDJI, Claude, Bernard DIU et Franck LALOË. *Mécanique quantique II*, Hermann, Collection Enseignement des sciences, Paris, 1992.

Collectif sous la direction de Dominique LECOURT. *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Quadrige / PUF, Paris, 2003.

CONDO, Jean-Charles et Natacha CONDO-DINUCCI. *Enquête sur le Secret*, Amérik Média, Montréal, 2008.

SOKAL, Alan et Jean BRICMONT. *Impostures intellectuelles*, 2<sup>e</sup> édition, Odile Jacob, Paris, 1997.

VACHER, Laurent-Michel. *Entretiens avec Mario Bunge : une philosophie pour l'âge de la science*, Liber, Collection De vive voix, Montréal, 1993.

VACHER, Laurent-Michel. *La science par ceux qui la font : dix entretiens sur les connaissances actuelles*, Liber, Montréal, 1998.

## Revues

*L'attracteur étrange*, n° 12 (« L'autre monde : une incursion dans l'univers quantique »), automne 2001, p. 1-12.

BOHR, Niels. « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Physical Review*, volume 48, October 15 1935, p. 696-702.

BUNGE, Mario. « Twenty-Five Centuries of Quantum Physics: From Pythagoras to Us, and from Subjectivism to Realism », *Science & Education*, 12, 2003, p. 445-466.

BUNGE, Mario. « Quanta are Quaint but Basic and Real, and the Quantum Theory Explains Much but not Everything: Reply to my Commentators », *Science & Education*, 12, 2003, p. 587-597.

EINSTEIN, Albert, Boris PODOLSKY et Nathan ROSEN. « Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Physical Review*, volume 47, May 15 1935, p. 777-780.

NIKOLIĆ, Hrvoje. « Would Bohr Be Born If Bohm Were Born Before Born? », *American Journal of Physics*, volume 76, n° 2, February 2008, p. 143-146.

STAPP, Henry P. « Henry Stapp on Quantum Mechanics, Spirit, Mind, and Morality. Quantum Interactive Dualism: an Alternative to Materialism », *Zygon*, volume 41, n° 3, September 2006, p. 599-615.

ZUREK, Wojciech Hubert. « Decoherence and the Transition from Quantum to Classical-Revisited », *Séminaire Poincaré*, volume 1, 2005, p. 1-23.

## Sites Internet

ABEL. *Le chat de Schrödinger*.

<http://www.chaouqi.net/index.php?Physique-quantique>

AYLWARD, Kevin. *Quantum Mechanics. The Ensemble Interpretation*.

<http://www.kevinaylward.co.uk/qm/index.html>

BEST, Ben. *The Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics*.

<http://www.benbest.com/science/quantum.html>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Premier cours (10 janvier 1989) : Rappel du cours de l'an dernier - Introduction au cours 88-89*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/10-1-89/10-1-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Deuxième cours (17 janvier 1989) : Etude d'un exemple simple : effet de l'émission spontanée d'un photon sur les cohérences quantiques d'un atome émetteur*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/17-1-89/17-1-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Troisième cours (24 janvier 1989) : Etude d'un exemple simple : effet de l'émission spontanée d'un photon sur les cohérences quantiques d'un atome émetteur (suite)*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/24-1-89/24-1-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Quatrième cours (31 janvier 1989) : Autre exemple de destruction des cohérences spatiales : diffusion de photons par des particules légères*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/31-1-89/31-1-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Cinquième cours (7 février 1989) : Autre exemple de destruction des cohérences spatiales : diffusion de photons par des particules légères (suite)*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/7-2-89/7-2-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Cohérences quantiques et dissipation. Sixième cours (14 février 1989) : Etude quantitative de la destruction des cohérences spatiales d'une particule brownienne*.

<http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/1988-89/14-2-89/14-2-89.pdf>

COHEN-TANNOUDJI, Claude. *Prédictions et probabilités en physique quantique*.

[http://e2phy.in2p3.fr/2006/Conferences\\_2006.htm#Tannoudji](http://e2phy.in2p3.fr/2006/Conferences_2006.htm#Tannoudji)

ESSER, Steve. *Wigner's Friend and Perspectivist Quantum Theory*.

<http://guidetoreality.blogspot.com/2007/02/wigners-friend-and-perspectivist.html>

MUYNCK, Willem M. DE. *The Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) problem.*  
<http://www.phys.tue.nl/ktn/Wim/qm21.htm#EPR>

PRICE, Michael Clive. *The Everett FAQ.*  
<http://www.hedweb.com/manworld.htm>

RAIMOND, Jean-Michel. *États « chat de Schrödinger » pour le champ.*  
<http://www.cqed.org/french/rydberg/nonresonant/Cats.html>

RAIMOND, Jean-Michel et Serge HAROCHE. *Du monde quantique au monde macroscopique : la décohérence prise sur le fait.*  
<http://www.cnrs.fr/Cnrspresse/n34a2.html>

STAPP, Henry P. *Wigner's Friend.*  
<http://www-physics.lbl.gov/~stapp/WignersFriendStapp.doc>

WHEELER, John Archibald. *Wigner's Changing View of the Elementary Quantum Phenomenon.*  
<http://flux.aps.org/meetings/YR02/APR02/baps/abs/S2130003.html>

WIKIPEDIA (anglais). *Bell's Theorem.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bell's\\_theorem](http://en.wikipedia.org/wiki/Bell's_theorem)

WIKIPEDIA (anglais). *Bell Test Experiments.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bell\\_test\\_experiments](http://en.wikipedia.org/wiki/Bell_test_experiments)

WIKIPEDIA (anglais). *Bohm Interpretation.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bohm\\_interpretation](http://en.wikipedia.org/wiki/Bohm_interpretation)

WIKIPEDIA (anglais). *Bohr-Einstein Debates.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr-Einstein\\_debates](http://en.wikipedia.org/wiki/Bohr-Einstein_debates)

WIKIPEDIA (anglais). *Consistent Histories.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Consistent\\_histories](http://en.wikipedia.org/wiki/Consistent_histories)

WIKIPEDIA (anglais). *Copenhagen Interpretation.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen\\_interpretation](http://en.wikipedia.org/wiki/Copenhagen_interpretation)

WIKIPEDIA (anglais). *Correspondence Principle.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Correspondence\\_principle](http://en.wikipedia.org/wiki/Correspondence_principle)

WIKIPEDIA (anglais). *Counterfactual Definiteness.*  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Counterfactual\\_definiteness](http://en.wikipedia.org/wiki/Counterfactual_definiteness)

WIKIPEDIA (anglais). *Ensemble Interpretation*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ensemble\\_interpretation](http://en.wikipedia.org/wiki/Ensemble_interpretation)

WIKIPEDIA (anglais). *Hidden Variable Theory*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden\\_variable\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Hidden_variable_theory)

WIKIPEDIA (anglais). *Idealism*.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Idealism>

WIKIPEDIA (anglais). *Interpretation of Quantum Mechanics*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Interpretation\\_of\\_quantum\\_mechanics](http://en.wikipedia.org/wiki/Interpretation_of_quantum_mechanics)

WIKIPEDIA (anglais). *Local Hidden Variable Theory*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Local\\_hidden\\_variable\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Local_hidden_variable_theory)

WIKIPEDIA (anglais). *Logical Positivism*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Logical\\_positivism](http://en.wikipedia.org/wiki/Logical_positivism)

WIKIPEDIA (anglais). *Many-Worlds Interpretation*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds\\_interpretation](http://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds_interpretation)

WIKIPEDIA (anglais). *Measurement Problem*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Measurement\\_problem](http://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_problem)

WIKIPEDIA (anglais). *Mermin, David*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/David\\_Mermin](http://en.wikipedia.org/wiki/David_Mermin)

WIKIPEDIA (anglais). *Objectivity (philosophy)*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Objectivity\\_\(philosophy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Objectivity_(philosophy))

WIKIPEDIA (anglais). *Philosophical Realism*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Philosophical\\_realism](http://en.wikipedia.org/wiki/Philosophical_realism)

WIKIPEDIA (anglais). *Positivism*.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Positivism>

WIKIPEDIA (anglais). *Principle of Locality*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Principle\\_of\\_locality](http://en.wikipedia.org/wiki/Principle_of_locality)

WIKIPEDIA (anglais). *Quantum Decoherence*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_decoherence](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_decoherence)

WIKIPEDIA (anglais). *Quantum Mechanics*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_mechanics](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_mechanics)

WIKIPEDIA (anglais). *Quantum Mysticism*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_mysticism](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_mysticism)

WIKIPEDIA (anglais). *Schrödinger's Cat*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Schrodinger's\\_cat](http://en.wikipedia.org/wiki/Schrodinger's_cat)

WIKIPEDIA (anglais). *Subjective Idealism*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Subjective\\_Idealism](http://en.wikipedia.org/wiki/Subjective_Idealism)

WIKIPEDIA (anglais). *Uncertainty Principle*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty\\_principle](http://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle)

WIKIPEDIA (anglais). *Wave Function Collapse*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wavefunction\\_collapse](http://en.wikipedia.org/wiki/Wavefunction_collapse)

WIKIPEDIA (anglais). *Wigner's Friend*.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Wigner's\\_friend](http://en.wikipedia.org/wiki/Wigner's_friend)

WIKIPEDIA (français). *Causalité (physique)*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Causalité\\_\(physique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Causalité_(physique))

WIKIPEDIA (français). *Chat de Schrödinger*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Chat\\_de\\_Schrodinger](http://fr.wikipedia.org/wiki/Chat_de_Schrodinger)

WIKIPEDIA (français). *Décohérence quantique*.  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Décohérence>

WIKIPEDIA (français). *Expérience d'Aspect*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Expérience\\_d'Aspect](http://fr.wikipedia.org/wiki/Expérience_d'Aspect)

WIKIPEDIA (français). *Idéalisme (philosophie)*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Idéalisme\\_\(philosophie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Idéalisme_(philosophie))

WIKIPEDIA (français). *Intrication quantique*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Intrication\\_quantique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Intrication_quantique)

WIKIPEDIA (français). *Mot-valise*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Mot\\_valise](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mot_valise)

WIKIPEDIA (français). *Objectivité*.  
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Objectivité>

WIKIPEDIA (français). *Positivisme logique*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Positivisme\\_logique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Positivisme_logique)

WIKIPEDIA (français). *Principe de correspondance*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe\\_de\\_correspondance](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_de_correspondance)

WIKIPEDIA (français). *Principe d'incertitude*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe\\_d'incertitude](http://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d'incertitude)

WIKIPEDIA (français). *Réalisme (philosophie)*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Réalisme\\_\(philosophie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Réalisme_(philosophie))

WIKIPEDIA (français). *Science et conscience*.  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Science\\_et\\_conscience](http://fr.wikipedia.org/wiki/Science_et_conscience)