

La physique quantique, 100 ans de questions

Thierry Masson
Chargé de Recherche au CNRS

Mars 2004

1. Qu'est-ce que la physique quantique ?

La physique quantique est née en 1900 lorsque le physicien allemand Max Planck publie les résultats de ses recherches sur le rayonnement du corps noir. Dans cet article, il introduit une nouvelle constante fondamentale de la physique qu'il désigne par h , qu'on nomme aujourd'hui la *constante de Planck*. L'irruption d'une nouvelle constante fondamentale en physique est toujours le signe d'un grand changement, et dans ce cas, on peut parler de révolution. Toute la représentation que les physiciens (et plus tard les chimistes) avaient alors de la nature allait se trouver complètement changée : nouveaux regards sur les phénomènes physiques, nouveaux outils mathématiques, et bien plus encore, nouvelle compréhension de la nature. 100 ans après ces premiers travaux, la physique quantique n'a pas encore livré tous ses secrets. L'un d'eux, celui qui a le plus diffusé dans le grand public, concerne son interprétation. L'objet de cet article est de rappeler ce qu'est aujourd'hui la physique quantique, de montrer ce qu'elle a de surprenant, et d'essayer de faire un état des lieux des récents travaux sur son interprétation (dans une seconde partie).

1.1. Les limites de la physique classique

La physique classique a régné en maître depuis que le physicien anglais Isaac Newton en a énoncé ses fondements. Trois siècles de développements mathématiques en ont fait une théorie et un cadre quasi universel à la fin du XIX^{ème} siècle. À l'origine développée pour modéliser la gravitation (aussi bien sur Terre que dans le système solaire), elle s'est enrichie au XIX^{ème} siècle de l'apport de l'*électromagnétisme*. Cette physique (aujourd'hui encore valable!) est capable d'expliquer le mouvement des planètes du système solaire, le mouvement d'objets chargés dans un champ électrique et/ou magnétique, le comportement des fluides les plus courants (eau, air, ...). Les *équations de Maxwell* de l'électromagnétisme (1855) ont unifiés le magnétisme et l'électricité. À la fin du XIX^{ème} siècle, les ondes électromagnétiques (dont la lumière fait partie) s'apprêtent à entrer de plein pied dans l'ère techno-

logique, avec les bouleversements qu'on connaît aujourd'hui. La lumière est alors considérée comme une *onde*. C'est le point de vue naturel issu de la théorie de Maxwell. Grâce aux travaux de Maxwell et Boltzmann sur la mécanique statistique (étude du comportement collectif de nombreux objets identiques), qui utilise elle-même la mécanique classique, la *thermodynamique* (la science de l'industrie du XIX^{ème} siècle, qui a accompagné entre autres la naissance des machines à vapeur) repose désormais sur des fondations solides. La structure intime de la matière commence à être explorée, avec la découverte en 1897 par Thomson de l'*électron*. Une théorie complète de l'interaction de l'électron et des ondes électromagnétiques est alors proposée par Lorentz. Par la suite, grâce à des expériences convaincantes (mouvement Brownien par exemple¹), l'existence des atomes et des molécules est admise comme une réalité. Rutherford parvient même à explorer l'intérieur d'un atome en 1911, et en donne une image moderne.

Alors, pourquoi la physique quantique ? La réponse est simple : il restait à la fin du XIX^{ème} siècle quelques expériences inexplicables dans le cadre de la physique classique. Il faut noter qu'un de ces problèmes conduira à une autre révolution de la physique du début du XX^{ème} siècle, la *relativité restreinte*, puis à son extension, la *relativité générale*, qui est une théorie de la gravitation compatible avec la relativité restreinte : c'est là une autre histoire ! On peut résumer les échecs (qui nous intéressent présentement) de la physique classique à la fin du XIX^{ème} siècle à trois problèmes :

1. Le « rayonnement du corps noir. » Sous ce nom obscur se cache un problème issu tout droit de la thermodynamique. Il est bien connu qu'un objet dont on élève la température change de couleur (un morceau de métal vire du noir au rouge, puis au blanc si on le chauffe). Le problème du rayonnement du « corps noir » est la modélisation idéalisée de cette expérience. Elle consiste à essayer de comprendre les caractéristiques du rayonnement électromagnétique qu'émet un tel corps

¹Le mouvement Brownien est le mouvement erratique que décrit par exemple un grain de pollen dans l'eau à la suite des chocs qu'il subit de la part des molécules d'eau.

« idéal » à une température donnée. Concrètement, un tel corps noir est bien approximé par ce qui se passe dans un four fermé. Expérimentalement, il a été possible de mesurer la répartition de l'énergie électromagnétique dans un tel four en fonction de la longueur d'onde électromagnétique. Cette courbe expérimentale n'a jamais pu être reproduite par un modèle reposant sur la mécanique statistique de Maxwell-Boltzman.

2. L'effet « photoélectrique. » On peut éjecter des électrons d'une plaque de métal en le « bombardant » d'ondes électromagnétiques (lumière ultra-violette). Le modèle classique prévoyait que la quantité d'électrons (et leur vitesse en sortant du métal) soit uniquement reliée à l'intensité de l'onde électromagnétique. En effet, dans la théorie classique, l'énergie d'une onde électromagnétique ne dépend que de cette intensité. Or, expérimentalement, on observe l'éjection d'électrons seulement si le rayonnement électromagnétique a une longueur d'onde plus petite qu'une certaine valeur de seuil. De plus, si la longueur d'onde est plus petite que cette valeur de seuil, on peut observer l'éjection d'électrons quelle que soit l'intensité de ce rayonnement !
3. Le « spectre atomique. » Les atomes (isolés) émettent ou absorbent la lumière (et les ondes électromagnétiques en général) seulement pour certaines longueurs d'ondes très particulières. Cet ensemble de valeurs, qu'on appelle le *spectre de l'atome* (ou « raies spectrales »), ne peut pas être expliqué par la physique classique.

On remarquera que ces trois situations font apparaître à la fois la matière (le four, la plaque de métal, l'atome) et la lumière (ou plus généralement les ondes électromagnétiques). C'est dans le cadre de cette interaction que la physique quantique s'est révélée expérimentalement en premier. Un autre problème de grande ampleur n'est pas évoqué ici, la *radioactivité*, découverte en 1896. Cette énigme ne sera pas un guide pour la construction de la physique quantique. Elle ne sera pleinement expliquée que bien plus tard, en utilisant à la fois la physique quantique, la relativité restreinte et la théorie des particules élémentaires.

1.2. La genèse de la physique quantique

Le problème du corps noir est le premier à être en partie expliqué en 1900 par Max Planck, dans l'article évoqué plus haut. Pour cela, il est contraint d'introduire une nouvelle constante physique, h , très petite dans les unités « courantes » des physiciens. Cette petitesse explique en partie pourquoi cette constante n'avait pas été remarquée plus tôt. En utilisant h , Planck parvient à reproduire la courbe expérimentale de la distribution d'énergie électromagnétique du

corps noir en fonction de la longueur d'onde. À l'origine, h est un paramètre ajusté à la main pour reproduire exactement cette courbe (dont la forme mathématique est donnée par avance par Planck, en utilisant des travaux antérieurs et des hypothèses nouvelles). Il faudra attendre quelques années encore pour comprendre la vraie signification de cette constante.

Cette explication repose sur une hypothèse d'Albert Einstein émise en 1905, qui lui permet d'expliquer l'effet photoélectrique : la lumière (et toute onde électromagnétique) est constituée de « grains » d'énergie. L'énergie d'un grain est inversement proportionnelle à la longueur d'onde électromagnétique, et proportionnelle à la constante h . Ce « quantum » d'énergie sera baptisé plus tard *photon*. Le mot « quantique » lui-même vient de cette hypothèse. Il faut bien comprendre ici l'apport d'Einstein par rapport à celui de Planck. Dans son explication du rayonnement du corps noir, Planck suppose que les *interactions* du rayonnement et de la matière se font par quanta d'énergie. Einstein va plus loin : la lumière est *constituée* de quanta d'énergie ! Cette hypothèse d'Einstein sera vérifiée expérimentalement autrement en 1924 dans l'« effet Compton, » dans lequel le photon interagit directement avec un *seul* électron. L'explication de l'effet photoélectrique est alors simple compte tenu de cette hypothèse. Un électron n'est éjecté du métal que s'il reçoit assez d'énergie de l'onde électromagnétique. Or cette énergie n'est donnée que « grain » par « grain » (les photons), et dépend de la longueur d'onde. Donc il existe un seuil au delà duquel le photon est suffisamment énergétique. Quant à l'intensité (au sens classique) de l'onde, elle est reliée à la *quantité* de photons. Même avec *un seul photon* (intensité très faible), il est possible d'éjecter un électron.

À partir de 1913, Niels Bohr utilise ce principe de quantification de la lumière pour construire un modèle de l'atome, qui permet d'expliquer les principales propriétés des raies spectrales. Son modèle de l'atome, qui a inspiré ce qu'on appelle aujourd'hui l'« ancienne théorie des quanta, » s'est révélé fructueux sur le plan des idées et des concepts nouveaux. Le point essentiel de son travail repose sur l'hypothèse que le mouvement des électrons autour du noyau est quantifié. Cette quantification implique que les électrons soient placés sur des orbites bien déterminées, un peu comme les planètes autour du Soleil. Un électron ne peut passer d'une orbite à une autre que s'il y a émission ou absorption d'un photon. Ce photon emporte ou apporte la différence d'énergie exacte entre les deux orbites. C'est pourquoi ces photons ne peuvent pas avoir n'importe quelle longueur d'onde, d'où les « raies. » Un bon accord avec l'expérience, malgré quelques limitations, a permis aux physiciens de poursuivre dans cette direction, et les a conduit à

la physique quantique telle qu'on la connaît aujourd'hui.

Après cette série de travaux, selon les situations expérimentales, la lumière pouvait être considérée comme une *onde*, régie par les équations de Maxwell, ou comme un jet de photons, dont le comportement est proche de celui de *corpuscules ponctuels*. En 1923, Louis de Broglie a l'idée d'étendre cette dualité onde-corpuscule aux particules matérielles (électrons, protons, ...), et jette les prémices d'une « théorie ondulatoire de la matière. » Puis en 1926, Erwin Schrödinger donne une équation d'évolution à cette onde de matière. Contrairement aux ondes habituellement rencontrées en physique jusqu'alors, l'amplitude de l'onde quantique est un nombre *complexe* (au sens mathématique). Ce n'est donc pas une onde habituelle, comme par exemple une onde à la surface de l'eau, pour laquelle l'amplitude est une hauteur, donc une grandeur réelle, mesurable. Il fallut un certain temps pour donner un sens à cette onde. Aussitôt cette équation écrite, le spectre de l'atome d'hydrogène (le plus simple des atomes, puisqu'il n'a qu'un seul électron) est reproduit.

Par la suite, peu de progrès conceptuels vont être faits en physique quantique. Le formalisme mathématique sera compris, exploré, et la mécanique quantique² se présentera sous son aspect moderne. Cependant, un pas très important est franchi par Dirac en 1928 lorsqu'il propose une version relativiste de l'équation de Schrödinger (au sens de la relativité restreinte). Cette équation prédit avec succès l'existence des « antiparticules. » Elle est le point de départ d'une nouvelle ère en physique théorique : la « théorie quantique des champs, » qui aboutira dans les années 1970 au « modèle standard » de la physique des particules (exploré expérimentalement dans les grands accélérateurs).

1.3. La formulation moderne de la mécanique quantique

Il ne fallut que quelques années à Heisenberg, Jordan, Dirac, Pauli, Born, von Neumann, ... pour obtenir un cadre mathématique bien établi de la physique quantique. Ce cadre mathématique est en rupture totale par rapport aux mathématiques de la physique classique. C'est ce qui fait que cette nouvelle théorie est si difficile à expliquer avec les mots de la langue courante, qui eux-mêmes sont issus de notre culture « classique » : position, vitesse, énergie, ...

Dans la formulation moderne de la mécanique

²Nous essayerons par la suite de distinguer la « physique quantique, » qui est l'ensemble des phénomènes physiques de nature quantique (par opposition à des phénomènes physiques de nature classique), et la « mécanique quantique, » qui est la modélisation (non relativiste) aujourd'hui utilisée de ces phénomènes.

quantique, les objets décrits sont complètement caractérisés par un être mathématique abstrait, sur lequel on se donne des règles qui permettent d'en extraire des informations en relation avec l'expérience. Cet être mathématique est appelé un *état*, pour préciser qu'il renferme toute l'information dont on dispose sur l'objet décrit. Cet état est solution de l'équation de Schrödinger, qui est une *équation d'évolution dans le temps*. Cette équation est *déterministe*, au sens où la donnée de l'état à un instant initial détermine complètement l'état à tous les instants ultérieurs. Dans certaines situations, cet état peut être représenté par une fonction de l'espace et du temps : c'est la *fonction d'onde* (l'onde de matière de de Broglie). Ainsi, un électron est décrit quantiquement par cette fonction d'onde, alors que classiquement, il l'était par la donnée de sa position dans l'espace et de sa vitesse. On ne peut donc plus le considérer comme ponctuel, et la fonction d'onde reflète sa « répartition » sur tout l'espace par la règle suivante, énoncée par Born : la *probabilité* de trouver l'électron à un endroit donné de l'espace dépend, mathématiquement, du carré du module de l'amplitude complexe de la fonction d'onde à cet endroit.

L'équation de Schrödinger a une propriété mathématique simple, mais aux conséquences physiques très importantes : si deux états sont solutions de cette équation, leur somme l'est aussi (on dit que l'équation est linéaire). Cela correspond au *principe de superposition* de la mécanique quantique. Donc si les états A_1 et A_2 sont des états possibles d'un objet quantique, alors $A_1 + A_2$ est aussi un état possible. En physique classique, on n'imagine pas de décrire l'état d'une planète comme la superposition de deux états possibles de cette même planète, par exemple un état où elle est d'un côté du Soleil, et l'autre où elle se trouve de l'autre côté ! C'est pourtant ce qu'on peut faire en mécanique quantique ! Ce principe de superposition est l'une des caractéristiques les plus essentielles de la physique quantique, qui la différencie nettement de la physique classique : c'est la source de la majorité des problèmes de compréhension et d'interprétation issus de la physique quantique. Afin d'illustrer ce principe, imaginons qu'une onde lumineuse monochromatique,³ issue d'une source ponctuelle, soit envoyée sur un obstacle opaque percé de deux fentes proches (voir figure 1). Sur un écran placé derrière cet obstacle, on observe une figure constituée de bandes sombres et claires. C'est l'expérience des « fentes d'Young, » connue depuis le XIX^{ème} siècle, et qui a démontré la nature ondulatoire de la lumière. Elle s'explique parfaitement à l'aide des équations de Maxwell, en disant qu'une partie de la lumière passe par une fente, et l'autre partie par l'autre fente. Sur l'écran, on observe

³idéalement constituée d'une seule longueur d'onde, c'est à dire d'une seule couleur

les figures d'interférences, communes à toute situation semblable où des ondes interviennent (par exemple, avec des ondes à la surface de l'eau, il est possible de réaliser cette même expérience). Or, il est possible de reproduire cette expérience de deux façons différentes aujourd'hui. La première consiste à envoyer la lumière *photon par photon*. À chaque envoi, l'écran s'illumine en un point seulement, là où le photon émis parvient à l'écran (à moins bien sûr que l'obstacle entre la source et l'écran ait intercepté ce photon, en ce cas, l'écran ne s'illumine pas). Si on envoie les uns après les autres de nombreux photons, et qu'on accumule sur l'écran les points éclairés (par exemple par un capteur électronique qui enregistre les événements), alors la figure d'interférence apparaît, *petit à petit* ! Par où passe *chacun* de ces photons ? Par les *deux* fentes ! Croire que le photon passe par une seule des fentes serait une erreur, comme nous le verrons par la suite. L'état du photon entre le moment où il part et le moment où il atteint l'écran est une superposition des états « passage par la fente 1 » et « passage par la fente 2. » Seul cet état est capable d'expliquer les figures d'interférence. L'autre expérience consiste à remplacer la lumière par des électrons. Là encore, il est possible de les envoyer un par un. On observe aussi des figures d'interférences sur un écran placé derrière les fentes. Cette expérience (plus compliquée en réalité) a été réalisée en 1927, et a permis de valider l'hypothèse ondulatoire de de Broglie. Ici aussi, la mécanique quantique prédit que chaque électron « passe » par les deux fentes en même temps.

Les règles de la mécanique quantique qui permettent de relier l'état d'un objet et les résultats expérimentaux donnent une interprétation *probabiliste* de certaines quantités. En effet, les résultats numériques possibles que peut produire une expérience sont parfaitement prédits par ces règles, mais seule la probabilité d'apparition de chacune de ces valeurs est donnée. On peut résumer la situation en disant que le résultat numérique d'une expérience apparaît comme tiré au hasard parmi les résultats possibles, avec une probabilité (« poids ») prédite par la théorie. Ainsi, une expérience doit nécessairement donner un résultat numérique dans un ensemble de résultats possibles prédits, et il faut répéter l'expérience un grand nombre de fois pour constater l'accord entre les probabilités théoriques et les fréquences d'apparition d'une valeur numérique particulière. Par exemple, on prédit avec une grande précision le spectre atomique de l'atome d'hydrogène, mais on peut seulement donner une probabilité sur la présence de l'unique électron de l'atome d'hydrogène dans une région donnée de l'espace ! Nous reviendrons sur les problèmes soulevés par ces probabilités dans la seconde partie.

Peu après la formulation moderne de la mécanique quantique, Heisenberg a trouvé des inégalités qui ont

causé un grand émoi, les *inégalités de Heisenberg*, appelées aussi abusivement « relations d'incertitude, » et parfois même « principe » d'incertitude (terme qui est faux, puisque ces inégalités sont une *conséquence* du formalisme et non un principe ajouté). Ces inégalités signifient que certaines grandeurs physiques ne peuvent pas être mesurées simultanément avec une précision aussi fine que l'on veut sur chacune de ces grandeurs. Par exemple, une mesure simultanée de la position et de la vitesse d'un électron est impossible avec une précision aussi grande qu'on veut sur les deux quantités. Le produit de l'imprécision sur la position et de l'imprécision sur la vitesse est supérieur à une constante proportionnelle à h . Cette inégalité est fondamentale, et ne peut pas être remise en question par quelque expérience que ce soit. Elle a été obtenue à l'origine en raisonnant sur des expériences de pensée mettant en jeu des mesures, mais en réalité c'est une conséquence *intrinsèque* de la description mathématique des états, et non d'une relation de l'état à la mesure (ce que suggère trop la terminologie « relations d'incertitude »). Tout état renferme en lui ces inégalités, elles expriment le fait que les quantités « position » et « vitesse » ne sont pas des grandeurs décrivant l'état d'un objet quantique, contrairement à la mécanique classique. C'est pourquoi on les qualifie aussi de *relations d'indétermination*. À l'échelle macroscopique (la vie courante), compte tenu de la petitesse de h , ces inégalités ne se manifestent pas, car les imprécisions sur les mesures (les erreurs commises en lisant l'appareil de mesure par exemple) sont largement supérieures à ces imprécisions intrinsèques. Nous reviendrons sur ces inégalités lors de la discussion de l'interprétation de la mécanique quantique.

La mécanique quantique décrit une assemblée d'objets quantiques O_1, O_2, O_3, \dots par un seul état qui prend en compte les degrés de liberté de tous ces objets à la fois, c'est-à-dire l'ensemble des grandeurs qui permettent de les caractériser complètement. Comme on peut s'en douter, cet état est très compliqué. Heureusement, il arrive parfois qu'on puisse dans cet état global « factoriser » un objet par rapport aux autres, par exemple O_1 . Il est alors possible de considérer l'état de O_1 indépendamment des autres, et donc d'étudier O_1 comme s'il était seul, avec un état mathématique beaucoup plus simple à manipuler. C'est ce qu'on fait concrètement lorsqu'on s'intéresse à une expérience particulière, sinon il faudrait considérer l'état qui contient les degrés de liberté de l'expérience elle-même, mais aussi de tout ce qui est dans la pièce, du bâtiment, etc. . . et donc en fin de compte de tout l'Univers ! Il arrive cependant que cette factorisation soit impossible. Par exemple, si des objets interagissent entre eux (ou ont interagi par le passé), cette procédure est parfois impossible à réaliser. Dans ces cas, le seul état sur lequel il est possible de « tra-

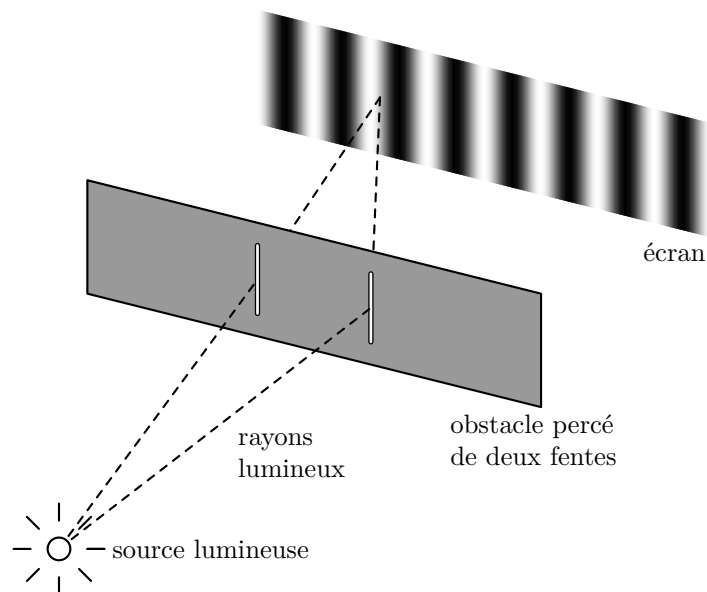


FIG. 1 – L'expérience des fentes d'Young

vailler » est celui qui représente tous les objets en même temps. Cette situation correspond à la propriété de *non-séparabilité* de la physique quantique. Cette propriété a des conséquences expérimentales et philosophiques considérables. En effet, la notion d'objet isolé est fortement ébranlée par ce principe : quels objets de la vie courante n'ont pas interagi dans le passé ? L'expérimentateur lui-même est un objet quantique dont il faudrait tenir compte ! Néanmoins, la pratique montre qu'il est souvent possible de s'affranchir des degrés de libertés « externes » au système étudié (le laboratoire, l'expérimentateur, ...). Entre différentes parties du système étudié, cette inséparabilité peut cependant se manifester.

En physique quantique, on sépare les objets en deux catégories : les « bosons » et les « fermions. »⁴ Des bosons identiques ont tendance à se regrouper dans le même état, alors qu'au contraire, deux fermions identiques refusent de se retrouver dans le même état (*principe d'exclusion de Pauli*). Cela a des conséquences importantes. La « solidité » de la matière est expliquée par le fait que les électrons (qui sont des fermions) présents dans les atomes se « repoussent, » et donc les atomes ne s'interpénètrent pas. Un faisceau laser n'est autre qu'une assemblée de photons (qui sont des bosons) tous dans le même état, ce qui procure à ce faisceau une très grande homogénéité, et des propriétés remarquables par rapport à un faisceau lumineux ordinaire. La mécanique statistique quantique (qui généralise la mécanique statistique de Maxwell-Boltzman), en est profondément modifiée. C'est elle

⁴Les mots « boson » et « fermion » viennent respectivement des noms des physiciens Bose et Fermi.

qui permet d'expliquer les propriétés du rayonnement du corps noir.

Une des conséquences fort nouvelles de la physique quantique fut la découverte du *spin*. Afin d'expliquer que deux électrons puissent occuper le même état dans un atome, ce qui est strictement interdit par le principe d'exclusion de Pauli, il a fallu introduire un nouveau *degré de liberté interne* aux électrons, le spin. Deux électrons peuvent alors apparemment occuper le même état dans un atome, car l'un a un « spin haut, » et l'autre un « spin bas, » ce qui fait qu'en réalité, les états sont bien différents. Le spin n'a pas d'équivalent classique, ce qui le rend difficile à expliquer sans formalisme mathématique. On peut cependant se le représenter comme une sorte de degré de liberté interne de « rotation » de l'électron sur lui-même (d'où le nom « spin, » qui signifie « tourner » en anglais). Dans cette analogie, un « spin haut » signifie qu'il tourne sur lui-même dans un sens, alors qu'un « spin bas » signifie qu'il tourne dans l'autre sens. On s'est vite rendu compte que tous les objets quantiques pouvaient avoir un spin, y compris des « gros » objets comme les atomes. D'un point de vue mathématique, la théorie du spin fut rapidement comprise, et étendait, en un certain sens, les degrés de liberté de rotation d'un solide sur lui-même (comme la Terre sur elle-même par exemple, d'où l'analogie). Néanmoins, les états possibles de spin ne se réduisent pas à deux valeurs possibles (haut, bas) comme c'est le cas du spin de l'électron : il existe des objets quantiques qui ont 1, 2, 3, 4, ... états possibles de spin. Cette hypothèse du spin fut rapidement transformée en certitude par l'expérience de Stern et Gerlach (voir figure 2). Celle-

ci repose sur le fait que la trajectoire d'un corpuscule ayant un spin peut être modifiée par l'action d'un champ magnétique bien particulier. Stern et Gerlach imaginent et réalisent un dispositif dans lequel un électron entre dans un tel champ magnétique. À sa sortie, si son spin est « haut, » l'électron a une trajectoire qui « monte, » alors que si son spin est « bas, » elle descend. Un écran placé un peu plus loin intercepte alors cet électron et il est possible de connaître son état de spin (selon qu'on le retrouve en haut ou en bas de l'écran!). Par la suite, après la découverte de nombreuses particules, une relation profonde a été constatée entre la statistique d'une particule (boson ou fermion) et les états de spin possibles. Cette propriété n'a pu être comprise qu'en prenant en compte la relativité restreinte.

En 1947, Richard Feynman a introduit une formulation différente (mais équivalente) de la mécanique quantique. Son idée est de s'intéresser à la probabilité qu'a un corpuscule d'arriver à un point donné de l'espace en partant d'un autre point donné. Pour calculer ce nombre, il faut considérer *tous les chemins* joignant le point de départ et le point d'arrivée, y compris ceux qui s'éloignent le plus de la trajectoire que suivrait ce corpuscule s'il était classique. À chacun de ces chemins, on associe un « poids » différent, qui dépend d'une quantité physique introduite en physique classique, l'*action* (dont l'unité de mesure est la même que h , qui est le produit d'une énergie par un temps). La probabilité cherchée dépend alors de la moyenne sur tous ces chemins pondérés par ces poids. Cela permet facilement de reproduire le comportement classique lorsque h est considéré comme très petit : on montre que le chemin qui contribue le plus à cette probabilité est celui qui minimise l'action. On retrouve ainsi le *principe de moindre action classique*! Dans cette version de la mécanique quantique, on voit que les objets ne sont plus localisés, et qu'il faut au contraire prendre en compte toutes les positions possibles de l'objet lorsqu'il se « déplace. » Dans l'expérience des fentes d'Young, il existe deux chemins de poids à peu près équivalents dont les contributions sont les plus déterminantes : ces chemins sont ceux qui passent en ligne droite de la source à l'une des fentes puis de cette fente à un point donné de l'écran. Ces deux chemins suffisent à expliquer (en première approximation) les franges d'interférence. Dans ce cas, il n'y a pas de chemin unique dont la contribution serait nettement supérieure aux autres, et donc *il n'y a pas de chemin classique*! Cette formulation de la physique quantique est surtout utilisée en théorie quantique des champs.

1.4. Les succès de la mécanique quantique

La mécanique quantique s'applique à l'échelle microscopique (celle des atomes, des molécules, et des objets encore plus petits) avec de grands succès. Elle a

apporté des explications à des phénomènes jusqu'alors inexplicables et a permis de nombreuses prédictions. Elle seule explique complètement les spectres et la structure électronique des atomes, les liaisons mises en jeu entre atomes au sein des molécules (les liaisons chimiques), le magnétisme de la matière, le comportement de la matière vis-à-vis des échanges de chaleur (la chaleur spécifique), les lasers, le comportement des électrons dans la matière, y compris la conduction électrique, etc. . . Depuis plus de 50 ans, toute la physique des particules élémentaires (la physique explorée dans les grands accélérateurs du CERN, où des particules se rencontrent à grande vitesse), à des dizaines d'échelles de grandeur plus petites que celle des atomes où elle a été conçue, repose sur la mécanique quantique (compliquée par la nécessité de prendre en compte la relativité restreinte).

Contrairement à une opinion répandue, la physique quantique se révèle aussi à l'échelle macroscopique. À température très basse, un des isotopes de l'hélium, l'hélium 4, devient liquide et acquiert un comportement étrange : si on le place dans un récipient, il remonte le long des parois ! Ce liquide n'a plus de viscosité. C'est la superfluidité, un phénomène purement quantique. Dans certains matériaux, à température basse, la conduction de l'électricité se fait sans résistance. C'est la supraconductivité, dont l'origine ne peut être expliquée que quantiquement. La cohérence du faisceau lumineux issu d'un laser⁵ peut se maintenir sur plusieurs kilomètres ! Dans ces cas, la physique quantique se manifeste car les objets quantiques conservent une « cohérence » (quantique) à grande échelle. Ceci est possible soit parce que la température est extrêmement petite, soit parce que le milieu est tel qu'il ne détruit pas cette cohérence (le vide, une fibre optique, . . .).

Aujourd'hui, la mécanique quantique est un outil indispensable de l'ingénieur, et de nombreux progrès technologiques reposent sur elle : les semi-conducteurs, utilisés dans toute l'électronique moderne, et les lasers en sont les exemples les plus importants. Mais les avancées technologiques ne s'arrêteront certainement pas là. En effet, depuis une trentaine d'années, le champ des expériences quantiques possibles a été largement étendu. Des manipulations d'objets quantiques totalement invisibles il y a quelques années sont aujourd'hui courantes : isoler un seul atome, et l'étudier pendant quelque temps, est désormais chose usuelle dans les laboratoires. De ce fait, des réponses expérimentales peuvent être apportées à des questions jusqu'alors considérées comme purement « académiques, » et bon nombre d'« expériences de pensée » proposées par les découvreurs

⁵Une lumière est dite cohérente lorsqu'elle est constituée d'ondes de même fréquence (même couleur) et parfaitement en phase les unes par rapport aux autres.

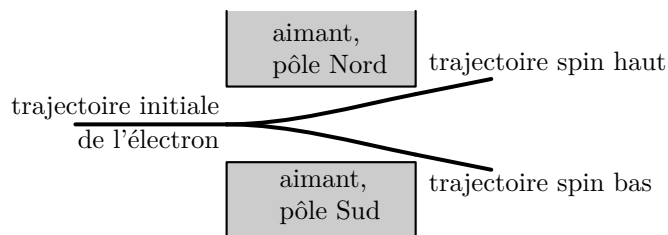


FIG. 2 – L'expérience de Stern et Gerlach

de la physique quantique sont devenues réalisables ! L'un des succès expérimentaux de ces dernières années est la création de « condensats de Bose-Einstein » d'atomes. Nous avons vu que des bosons identiques ont tendance à se regrouper dans le même état. Or il se trouve que certains atomes sont des bosons. La tentation était donc grande d'essayer de placer une assemblée de tels atomes dans un même état quantique : c'est ce qu'on appelle un condensat de Bose-Einstein. Pour réaliser ce condensat, il faut confiner ces atomes dans une sorte de petite « boîte, » à très basse température. C'est ce que sont parvenus à faire les physiciens ces dernières années. Aujourd'hui, de tels condensats sont courants, et font l'objet d'études approfondies. De tels progrès expérimentaux suggèrent aujourd'hui des idées nouvelles d'applications technologiques. Ainsi, les physiciens (aidés d'informaticiens) envisagent des « ordinateurs quantiques, » dont le principe de fonctionnement est très différent des ordinateurs usuels, et dont la puissance de calcul serait très largement supérieure à ce qui est concevable aujourd'hui par les méthodes traditionnelles. Mentionnons aussi la cryptographie quantique, dont les premières expériences ont déjà montré la faisabilité (au moins dans des laboratoires !).

Les succès de la mécanique quantique sont tels aujourd'hui qu'il est impensable de la remettre en question complètement. Ce qui ne signifie pas que l'on ne puisse pas un jour faire mieux ! Paradoxalement, son interprétation est toujours sujette à débat. C'est l'objet de la seconde partie.

2. L'interprétation de la mécanique quantique : d'hier à aujourd'hui

80 ans après sa formulation, la mécanique quantique est encore source d'incompréhension et plus grave encore, de confusions.⁶ Compte tenu de la complexité des mathématiques utilisées, de la remise en cause radicale de certains concepts classiques, de la profondeur des problèmes soulevés, des expériences récentes qui suscitent des interrogations nouvelles, il

⁶sans parler de sa récupération par les pseudo-sciences !

est certain que les débats sur l'interprétation de la mécanique quantique sont loin d'être clos. Nous allons essayer d'éclairer ces débats en faisant état des développements récents dans ce domaine.

2.1. Le problème de la mesure

L'un des problèmes majeurs de l'interprétation de la mécanique quantique repose sur la notion de *mesure*. En physique classique, mesurer une grandeur n'a jamais posé de problème particulier, en dehors d'éventuelles difficultés techniques. Ainsi, si on mesure la vitesse d'une voiture à l'aide d'un radar de gendarmerie, l'état de la voiture n'en sera que peu modifié. En physique classique, on suppose toujours que les mesures sont menées de telle façon que le système n'en ressort pas perturbé. Il en va tout autrement en physique quantique : l'acte de mesure modifie l'état du système. Aucune expérience de mesure ne peut contourner ce fait.

Le dispositif de Stern et Gerlach peut être utilisé comme appareil de mesure du spin d'un électron, puisque, selon le spin, l'électron sort de l'appareil avec une trajectoire vers le haut ou vers le bas. Il suffit donc de détecter cette trajectoire pour connaître le spin. Lorsqu'on effectue une telle expérience, voici ce qui se passe. Si l'électron entre dans l'état « spin haut, » noté $(S+)$ pour la suite, alors la valeur mesurée du spin est toujours « haut » (ce qu'on désignera par $+$). Dans ce cas, on a une probabilité 1 de trouver $+$. Si l'électron entre dans l'état $(S-)$ (« spin bas »), alors la mesure est toujours $-$ (« bas ») : on a une probabilité 1 de trouver $-$. Si l'électron entre dans l'état superposé $(S+) + (S-)$, on a une probabilité $1/2$ d'obtenir $+$ et $1/2$ d'obtenir $-$ comme résultat de la mesure. Dans tous les cas, *l'état de l'électron après la mesure est soit $(S+)$, soit $(S-)$, selon que l'on trouve $+$ ou $-$ comme mesure*. Pour le montrer, il suffit de placer un second appareil de Stern et Gerlach derrière le premier : le résultat donné par ce second appareil est toujours le même que celui donné par le premier. Donc l'état de l'électron a été modifié par l'appareil de mesure, selon la règle suivante :

- $(S+)$ à l'entrée donne après la mesure $(S+)$ avec une probabilité 1 ;

- ($S-$) à l'entrée donne après la mesure ($S-$) avec une probabilité 1 ;
- ($S+$)+($S-$) à l'entrée donne après la mesure soit ($S+$) avec une probabilité 1/2, soit ($S-$) avec une probabilité 1/2.

Dans les deux premières situations, l'état n'est pas modifié par la mesure. Dans la dernière, l'état est modifié et le choix de l'état ($S+$) ou ($S-$) est dû au hasard le plus absolu : rien ne permet aujourd'hui de l'expliquer.

Cette propriété est plus générale que ce que cette expérience particulière suggère. En effet, en physique quantique, *l'état de l'objet quantique après une mesure peut être très différent de l'état avant la mesure, et dépend du résultat de la mesure*. L'expérience montre que l'état après la mesure donnerait toujours le résultat qui vient d'être trouvé avec une probabilité 1. On appelle ce phénomène la *projection de l'état* sur le résultat de la mesure, ou encore la *réduction de la fonction d'onde*. Cette propriété a été vérifiée jusqu'à aujourd'hui dans toutes les expériences effectuées (qui sont nombreuses!). C'est très simple à faire, puisqu'il suffit pour chaque mesure effectuée de la répéter juste après : les deux résultats de mesure sont toujours les mêmes. Pour le physicien, ce phénomène est déconcertant, car l'évolution de l'état entre l'instant juste avant la mesure et l'instant juste après *n'obéit pas* à l'équation d'évolution de Schrödinger ! Ce qui se passe pendant la mesure n'est pas un processus d'évolution quantique, au sens de la mécanique quantique. C'est comme si l'appareil de mesure agissait sur l'état de l'électron *autrement* que par un processus quantique, tel qu'on sait les décrire dans le formalisme expliqué plus haut ! Pourtant, si la mécanique quantique est une théorie universelle, l'appareil de mesure doit lui-même être considéré comme un objet quantique (puisque constitué d'atomes, qui sont *in fine* quantiques). Aussi, la mécanique quantique devrait pouvoir décrire le système constitué de l'électron *et* de l'appareil de mesure. Dans cette façon de procéder, l'état total de ce système obéit à l'équation de Schrödinger. Or il est impossible que cette évolution reproduise la projection de l'état de l'électron. C'est une impossibilité mathématique, elle ne dépend pas de la façon éventuelle de décrire l'appareil de mesure. Nous sommes là au cœur du problème de l'interprétation de la mécanique quantique. Comment expliquer ce qui se passe lors d'une mesure ? Comment expliquer que l'état obtenu à la sortie n'ait pas évolué *quantiquement* (au sens de l'équation de Schrödinger) pendant la mesure ? Comment interpréter une théorie qui ne parvient pas à décrire ce processus de mesure ? Enfin, autre question de taille : pourquoi le résultat d'une mesure semble-t-il choisi au hasard parmi les résultats possibles ?

Revenons un instant à l'expérience des fentes

d'Young, où des photons sont envoyés un par un. On peut la modifier en plaçant un détecteur de photon au niveau des fentes (qui bien sûr n'intercepte pas le photon), qui nous dit par quelle fente passe le photon. Si on réalise cette nouvelle expérience, les figures d'interférences disparaissent ! En effet, ce détecteur *effectue une mesure* sur la position du photon, et donc l'état du système après cette mesure est modifié. Cette modification implique que l'expérience *avec* le détecteur est complètement différente de l'expérience *sans* le détecteur, au point que les figures d'interférences ne peuvent plus apparaître dans la première. Il suffit pour s'en convaincre de comparer les états juste après le passage par les fentes : compte tenu de la réduction de la fonction d'onde, dans l'expérience avec le détecteur, l'état est par exemple « passage par la fente 1 » (si le photon est détecté sur la fente 1) alors que dans l'expérience sans le détecteur, il est encore superposition des deux états : « passage par la fente 1 » + « passage par la fente 2. »

De nombreuses propositions ont été faites depuis 80 ans pour s'attaquer au problème de la mesure. Historiquement, dès les années 1920, le débat fut posé avec les bonnes questions. La célèbre controverse entre Einstein et Bohr à propos des fondements et de l'interprétation de la mécanique quantique est encore aujourd'hui d'actualité, et de nombreuses réflexions ultérieures y font référence.

La réponse d'Einstein est plutôt simple à résumer. De son point de vue, la mécanique quantique n'est pas *complète*. Puisqu'elle n'explique pas correctement ce qui se passe lors d'une mesure, puisqu'elle suppose un hasard absolu (lors de la mesure), il lui manque quelque chose. Sa célèbre citation, « Dieu ne joue pas aux dés, » résumait très bien son point de vue sur l'irruption des probabilités en mécanique quantique.

Au contraire, la réponse de Bohr est plus compliquée, car il s'est efforcé de construire une nouvelle philosophie de la connaissance à partir de cette nouvelle physique. Pour lui, la physique classique ne doit pas être abandonnée complètement. Lors de ses travaux sur l'ancienne théorie des quanta, il a introduit le *principe de correspondance* pour essayer de déterminer la validité des concepts classiques. Ce principe essayait de formaliser les liens entre les « grandeurs » quantiques et leurs équivalents classiques, et servit de guide pour construire l'ancienne théorie des quanta. Plus tard, lorsque la mécanique quantique fut exprimée dans sa forme définitive, ce principe de correspondance fut le point de départ de son interprétation. Pour lui, l'interprétation des données expérimentales en physique quantique doit nécessairement reposer sur l'emploi des concepts classiques. Pour résoudre concrètement le problème de l'acte de mesure, il faut considérer l'appareil de mesure comme un *appareil classique*. Pratiquement, c'est de toute façon ce qui se

passe au laboratoire. De par leur taille et leur masse, les appareils de mesure sont traités classiquement. Les modéliser quantiquement, bien que conceptuellement faisable, est impossible, compte tenu du nombre important de degrés de liberté mis en jeu. En effet, un tel appareil peut être constitué de milliards de milliards d'atomes, qui ont chacun au moins trois degrés de liberté (définir leur position dans l'espace nécessite trois grandeurs) : cela fait des milliards de milliards de degrés de liberté ! Or, concrètement, ce qui nous intéresse dans un tel appareil de mesure peut être décrit par quelques degrés de libertés seulement, par exemple la position d'une aiguille sur un écran (dans ce cas, une seule grandeur, un angle), ou bien, pour les appareils plus récents, l'affichage digital sur un écran. Pour Bohr, la notion même d'« expérience » est intrinsèquement classique : afin de décrire une expérience à d'autres physiciens, il est nécessaire de faire usage de concepts classiques ! Cette proposition de Bohr n'a pas été acceptée par tous. En effet, elle suppose que la nature soit décrite par deux théories : les objets microscopiques sont quantiques, les objets macroscopiques sont classiques. C'est inacceptable pour la majorité des physiciens : si la physique quantique est destinée à devenir *la* théorie qui va au-delà de la physique classique, alors elle doit s'appliquer à toutes les situations.

Pour Bohr, la réduction de la fonction d'onde doit faire partie des *postulats de la mécanique quantique*.⁷ Cette dynamique « extra-quantique » est une règle supplémentaire, qui permet de caractériser complètement l'état après la mesure.

L'interprétation que propose Bohr s'appelle aujourd'hui *l'interprétation de Copenhague*. Elle a en effet été conçue lors de discussions entre Bohr, Heisenberg et Pauli lors de rencontres au laboratoire de Bohr à Copenhague. Dans cette interprétation, on voit que la mesure est un acte très particulier, qui fait référence à la physique classique, et qui fait intervenir un *hasard intrinsèque*. Il faut remarquer que ce hasard n'est pas celui de la vie courante, qui repose, lui, sur une connaissance *insuffisante* des conditions initiales, tout en émergeant de *lois déterministes* (comme par exemple le hasard qui se manifeste lors du tirage du Loto). Cette interprétation du hasard quantique a suscité de nombreuses objections. Par ailleurs, comme nous l'avons déjà remarqué, le physicien n'a aucune raison de traiter à part la mesure : l'appareil de mesure peut être considéré comme quantique, et devrait donc à ce titre pouvoir être décrit avec le système étudié par les équations de la mécanique quantique. Malgré ces problèmes, l'interprétation de Copenhague est celle qui est utilisée aujourd'hui quotidiennement par les physiciens dans les laboratoires. Faute de mieux

⁷C'est ce que font d'ailleurs la plupart des ouvrages académiques sur la physique quantique.

et de plus convaincant, il faut faire preuve de pragmatisme !

Von Neumann a beaucoup influencé la conception moderne que l'on a de la mécanique quantique. Mathématicien de formation (élève de Hilbert), c'est lui qui le premier a proposé le cadre mathématique utilisé aujourd'hui. Grâce à ce formalisme, il est le premier à proposer un *modèle* de la mesure. Dans ce modèle, tout est quantique : le système étudié et l'appareil de mesure forment un système quantique global. Bien que pertinent sur certains points, ce modèle ne parvient pas à expliquer le choix aléatoire qui se produit pendant la mesure, c'est à dire l'acte de réduction de la fonction d'onde. Même s'il ajoute un second appareil de mesure (puis un troisième, ...) pour « mesurer » le précédent, la réduction de la fonction d'onde ne peut pas avoir lieu.⁸ Pour contourner le problème, il émet l'hypothèse la plus curieuse qui soit : cette projection ne peut avoir lieu que si au bout de la chaîne d'appareils de mesure on introduit un être conscient ! Son idée semble reposer sur la constatation que la conscience est unique, et donc le choix d'un des états est nécessairement fait lorsque l'être conscient prend connaissance des résultats de la mesure ! Il est surprenant qu'une telle idée ait pu être émise, il est encore plus surprenant qu'elle ait été reprise plus tard par quelques autres physiciens. Il est en effet difficile de croire que l'affichage du résultat d'une mesure sur un écran d'ordinateur, ou son impression par une imprimante, ne s'effectue que lorsqu'un être conscient est là pour les regarder ! C'est pourtant le serpent de mer de l'interprétation de la mécanique quantique, que seule peut-être les sciences cognitives et la neurobiologie permettront un jour de jeter définitivement aux oubliettes. . . Roland Omnès résume très bien ce que tout physicien censé pense de cette hypothèse : « on doit certainement la classer comme la pire des déviations auxquelles l'interprétation de la mécanique quantique a pu conduire. » [1]

Afin de répondre à cette absurdité, Schrödinger imagine en 1935 une expérience de pensée qui popularisera le problème de la mesure. Il imagine le dispositif expérimental suivant. Dans une grande boîte fermée, on place un appareil qui surveille la désintégration d'un noyau radioactif. Si le noyau se désintègre, l'appareil libère un gaz mortel dans la boîte. On place un chat dans cette boîte, on la ferme, et on attend. . . Selon von Neumann, connaissant les lois de la désintégration radioactive (qui sont quantiques), au bout d'un certain temps l'état quantique du système enfermé dans la boîte consiste en la superposition d'un état où le chat est vivant, et d'un état où le chat est mort. Toujours selon von Neumann, c'est seulement lorsque l'observateur ouvre la boîte que la superpo-

⁸En termes mathématiques, cette impossibilité est due à l'évolution *unitaire* de l'état quantique.

sition cesse, et qu'un des deux états est sélectionné (chat vivant ou chat mort)! Il faut rappeler ce que Bohr pensait de cette expérience : pour lui, l'appareil et le chat sont classiques, et donc la réduction de la fonction d'onde a lieu dès que l'appareil détecte la désintégration. Heisenberg partageait en partie ce point de vue : pour lui il est absurde de modéliser aussi simplement ce pauvre chat, qui contient un nombre gigantesque de degrés de liberté (son « état » ne se résume donc pas à « mort » ou « vivant »). L'interprétation de Copenhague montre pourtant là qu'elle est loin d'être satisfaisante. Elle révèle un problème de cohérence logique fondamental de la théorie : pour expliquer la mécanique quantique, il faut faire appel à la physique classique. De plus, une question naturelle se pose alors : où se situe la frontière entre quantique et classique dans une telle expérience? Le noyau radioactif est-il quantique ou classique? Et l'appareil de détection? Et le chat? ...

D'autres interprétations ont par la suite été proposées, principalement pour chercher à contourner ce problème de la réduction de la fonction d'onde. L'une des plus surprenantes est celle des *multiunivers* d'Eve-rett. Elle consiste à supprimer la réduction de la fonction d'onde du formalisme (et donc aussi le hasard qui lui est lié), et à émettre l'hypothèse audacieuse que chaque mesure conduit à « plusieurs branches » nouvelles de l'Univers : une branche pour chaque résultat possible de la mesure. Ainsi, chacune de ces branches est supposée être une réduction possible de la fonction d'onde. Dans cette interprétation, la réalité physique n'est donc plus unique, et les « branches » ne sont plus en communication entre elles. Ceci assure la logique de cette interprétation. Cette théorie est pour l'instant non réfutable!

Certains chercheurs (de Broglie et plus tard Bohm) ont essayé de refonder la mécanique quantique sur des bases plus « classiques, » en conservant les notions de position et de vitesse. Pour concilier ces concepts classiques avec la nouvelle théorie, ils interprètent la fonction d'onde comme une « onde pilote » qui *accompagne* la particule, et dont l'évolution est donnée par une équation semblable à celle de Schrödinger. La dynamique classique de la particule est modifiée par cette fonction d'onde. Dans cette approche, l'interprétation pose moins de problèmes puisque le caractère classique de la théorie y est conservé, par exemple les particules sont toujours localisées. Le hasard perçu lors d'une mesure n'y est pas intrinsèque, il émerge de notre ignorance de l'état initial complet du système. Cependant, cette théorie se heurte à des problèmes techniques jusqu'à présent insolubles.

2.2. Le paradoxe EPR

En 1935, Einstein, Podolski, et Rosen proposent une expérience de pensée essayant de mettre en

évidence l'incomplétude de la mécanique quantique. Pour cela, ils donnent au préalable une définition précise et opérationnelle de ce qu'est un élément de réalité : « si, *sans perturber aucunement le système*, nous pouvons prédire avec certitude (c'est-à-dire avec une probabilité égale à un) la valeur d'une quantité physique, alors il existe un élément de réalité physique correspondant à cette quantité physique. » Les trois auteurs proposent alors une expérience qui conduit à ce qu'on appelle le *paradoxe EPR*. On considère un objet quantique M qui est constitué de 2 parties identiques A_1 et A_2 . On suppose que M est au repos, et qu'il peut se désintégrer spontanément en ses deux constituants A_1 et A_2 . Par conservation de quantités usuelles en physique (encore valable en physique quantique!), A_1 et A_2 vont partir avec des vitesses opposées et s'éloigner de l'endroit où se trouvait M . Au bout d'un temps suffisamment long, Einstein, Podolski, et Rosen supposent que les objets quantiques A_1 et A_2 sont assez éloignés pour ne plus entretenir de relations. Ils les considèrent donc comme *deux systèmes indépendants*. Il est alors possible d'effectuer une mesure aussi précise que l'on souhaite de la vitesse sur A_1 , et d'après l'hypothèse d'éloignement, le système A_2 n'est pas perturbé. Comme la vitesse de A_2 est l'opposée de celle de A_1 , on a réalisé une mesure de la vitesse de A_2 « sans perturber aucunement le système! » Donc il doit exister un élément de réalité pour la vitesse. De plus, on peut mesurer avec une grande précision la position de A_2 à un instant donné. Donc les inégalités de Heisenberg sur les incertitudes en position et vitesse peuvent être violées!

La réponse de Bohr ne se fit pas attendre : pour lui, le point faible de l'argumentation était l'hypothèse de séparabilité des deux sous-systèmes A_1 et A_2 . En effet, ces systèmes ayant interagi dans le passé, ils sont *inséparables* au sens quantique. Ce qui entraîne que si on croit effectuer une mesure sur A_1 , en réalité on effectue une mesure sur le système $A_1 + A_2$! C'est le système global qui est perturbé, et non pas seulement A_1 : la mesure sur A_1 réduit donc la fonction d'onde de $A_1 + A_2$ (ce qui perturbe du coup le sous-système A_2). Rappelons que A_1 et A_2 peuvent à ce moment là être distants de plusieurs mètres, voire kilomètres! Donc il n'y a pas d'élément de réalité attaché à la vitesse, et les inégalités de Heisenberg ne sont pas mises en défaut.

D'autres réponses furent (et sont encore) proposées. Certaines supposent par exemple l'existence de variables supplémentaires qui « caractériseraient » mieux l'objet quantique que ne le fait l'état mathématique usuel. Comme ces variables ne sont pas « visibles » (actuellement?) dans les expériences, ces théories sont appelées à *variables cachées*. Ces variables permettraient de redonner aux probabilités quantiques un statut plus « statistique, » puisque ces

probabilités émergeraient de notre non connaissance de ces variables. Chaque mesure serait alors comme un tirage du Loto, où le résultat serait complètement déterminé par ces variables, dont on ne connaît pas les valeurs précises : en moyennant les valeurs possibles de ces variables, on retrouverait une interprétation probabiliste du résultat de la mesure, tout en revenant à une causalité parfaite. Dans l'expérience EPR, ces variables permettraient de corrélérer les résultats de mesure sur les deux sous-systèmes A_1 et A_2 . Les premières théories à variables cachées supposaient que ces variables accompagnent le corpuscule dans son mouvement. On parle alors de théories à *variables cachées locales*.

Aussi avait-on plusieurs options possibles pour contourner le paradoxe EPR. C'est en 1965 que Bell trouva un moyen fort astucieux de trancher expérimentalement entre ces différentes possibilités. Il démontra (avec une incroyable facilité !) l'existence d'inégalités qui permettent de faire la différence entre la mécanique quantique et d'autres théories, par exemple celles à variables cachées locales ! Ces inégalités de Bell étaient explorables expérimentalement. Lorsque la technologie fut disponible, des expériences furent menées. Il en ressort que la *mécanique quantique avait raison* : l'inséparabilité est une propriété des systèmes quantiques, la réponse de Bohr était correcte. Le paradoxe EPR, dans sa forme originale, avait donc obtenu une réponse expérimentale. Les théories à variables cachées locales étaient réfutées. On pouvait penser que l'expérience d'Alain Aspect de 1982 [3] avait définitivement clos le débat, de par ses conclusions non équivoques. Dans cette expérience, les sous-systèmes A_1 et A_2 sont des photons émis par un atome au repos. Afin de vérifier les inégalités de Bell, il faut mesurer des grandeurs sur ces deux sous-systèmes, si possible en même temps, et étudier leurs corrélations. Cependant, dans ces expériences, on ne peut pas avoir une simultanéité *exacte* entre les deux mesures. Donc l'une a toujours lieu avant l'autre. Comme l'imagination des physiciens est sans limite, d'autres théories furent alors proposées (à *variables cachées non locales* par exemple), concurrentes de la mécanique quantique, dans lesquelles il est possible qu'une information soit échangée entre la première particule qui a subi la mesure, et la seconde (qui ne l'a pas encore subie). Cette information servirait à corrélérer les deux mesures, de telle sorte que les mêmes résultats que ceux de la mécanique quantique soient obtenus *in fine*. Compte tenu de la distance qui peut séparer les deux sous-systèmes A_1 et A_2 au moment de la mesure, l'information qu'ils pourraient s'échanger devrait nécessairement aller plus vite que la lumière. Même si la relativité restreinte ne l'admet pas, il n'est pas déraisonnable d'essayer de tester cette éventualité. C'est pourquoi une expérience récente a été faite

en Suisse [4], qui *donne raison elle aussi à la mécanique quantique*. C'est une variante de celle d'Aspect, dans laquelle les détecteurs qui mesurent les grandeurs physiques sont en *mouvement par rapport au laboratoire*. Dans ce cas, en utilisant la théorie de la relativité restreinte, dans laquelle la notion de simultanéité des événements est « relative, » on peut montrer qu'il n'est plus possible de savoir *quelle mesure a eu lieu avant l'autre !* (On parle d'expériences de « multsimultanéité. ») Il n'est donc plus permis de se demander qui a envoyé une information à l'autre, et les théories qui supposent l'échange d'informations sont réfutées ! Il en ressort aujourd'hui que la mécanique quantique *n'est pas une théorie locale* (quelle que soit la distance séparant deux sous-systèmes, une mesure sur l'un peut « influencer » l'autre), et qu'elle est cependant compatible avec certains aspects de la relativité restreinte. Ces expériences ébranlent profondément notre conception actuelle de l'espace-temps et n'ont pas fini de faire couler beaucoup d'encre. . .

2.3. La connaissance en mécanique quantique

Lors de l'élaboration de l'ancienne théorie des quanta, Bohr ne s'était pas arrêté au problème de la mesure. Afin de prendre en compte la dualité onde-corpuscule qui émergeait de ces travaux, il introduisit un (second) principe : le *principe de complémentarité*. Ce principe pose que des « représentations » différentes, et parfois incompatibles, peuvent être utilisées à propos d'un même objet quantique. Ainsi, selon la situation expérimentale, l'électron peut être décrit comme une onde (expérience des fentes d'Young par exemple) ou comme un corpuscule (trajectoire balistique dans un champ électrique par exemple), mais on ne peut pas utiliser les deux langages en même temps : c'est le contexte expérimental qui décide ! On avait donc une vision duale de la nature, qui reposait d'un côté sur la notion de « continu, » et de l'autre sur la notion de « discontinu. » Ce principe a parfois été utilisé pour remettre en cause notre capacité à caractériser les objets quantiques, et du coup à décrire la réalité : s'il nous est impossible de choisir entre une représentation ou une autre, c'est que notre connaissance est limitée. Aujourd'hui, dans la formulation moderne de la mécanique quantique, *ce problème ne se pose plus*. En effet, il reflète juste la richesse mathématique dans laquelle est plongé l'état d'un objet quantique : on peut caractériser cet état sous différentes formes mathématiques, qui lui donne tantôt un « aspect ondulatoire, » tantôt un « aspect corpusculaire, » et tantôt ni l'un, ni l'autre (ce que les premiers travaux n'avaient pas remarqué) ! Par exemple, dès qu'on utilise une fonction d'onde comme représentation de cet état, on en a une interprétation on-

dulatoire. Finalement, en réalité, cette dualité est un héritage de notre culture classique : après des années d'habitudes et d'apprentissages, nous ne parvenons pas à concevoir un objet autrement que comme une onde ou un corpuscule se déplaçant dans l'espace ! La solution élégante que proposent J.-M. Levy-Leblond et F. Balibar [7] mériterait d'être plus utilisée : ne parlons ni d'onde, ni de corpuscule, mais de *quanton*. Ce quanton désignerait un objet quantique, décrit par son état mathématique. Libre à nous ensuite de le représenter comme une onde, un corpuscule ou autre chose en fonction de nos besoins. . .

Les inégalités de Heisenberg ont aussi soulevé le problème de ce qui est « connaissable » en mécanique quantique. En physique classique, connaître l'état d'un corpuscule à un instant donné revient à se donner à cet instant sa position et sa vitesse. En physique quantique, cela revient à se donner l'être mathématique qui représente cet état. Or, d'après les inégalités de Heisenberg, de cet être mathématique il est impossible de tirer à la fois ce qui est censé représenter la position et la vitesse. Certains physiciens et philosophes ont interprété ce résultat comme une limitation intrinsèque de notre connaissance de la réalité. Cette conclusion suppose implicitement que la position et la vitesse existent en dehors de la description que nous avons d'un objet quantique. Or, ces notions de position et vitesse sont *classiques*. Rien ne permet aujourd'hui d'affirmer leur pertinence au delà de ce cadre classique. Pour illustrer ce propos, rappelons que la notion de température est un concept essentiel et fondamental de la thermodynamique. Cependant, la physique statistique, qui est la théorie sous-jacente à la thermodynamique, ne lui donne pas ce statut premier, elle la déduit!⁹ Donner un statut de réalité à la position et à la vitesse est malheureusement un raisonnement classique, qu'il faut bannir en physique quantique : un électron n'est pas un point matériel caractérisé par une position et une vitesse à tout instant (ni d'ailleurs par une « onde » répartie dans tout l'espace !). Dans le cadre d'une expérience particulière, il est possible de donner un sens à la position *ou* à la vitesse, mais ce n'est pas une quantité intrinsèque préexistante. On ne peut donc pas dire que les inégalités de Heisenberg réduisent notre connaissance d'un objet quantique. Cette connaissance peut être obtenue expérimentalement avec une grande précision, sous forme d'une caractérisation complète de son état mathématique. Un processus qui est souvent ignoré des profanes est celui de *préparation* d'un objet quantique : il est possible de « préparer » un objet quantique dans des états parfaitement déterminés, et de caractériser entièrement son évolution future par l'équation de Schrödinger. Dans ce cas, où se situe

notre ignorance ? *Les inégalités de Heisenberg ne sont donc pas une limitation de notre connaissance.*

Le vrai problème vient plutôt du statut exact des probabilités en physique quantique, et de la réduction de la fonction d'onde. Nous n'avons aucune connaissance préalable qui permette de prévoir à l'avance l'état juste après une mesure. Néanmoins, jusqu'à présent, toutes les expériences réalisées ont pu être expliquées en utilisant la description mathématique évoquée plus haut, moyennant ce problème fondamental que pose l'interprétation probabiliste. Or, ce qui est connaissable est par définition ce que l'expérience peut nous enseigner. À partir de ce que nous savons aujourd'hui, il est possible d'émettre deux hypothèses :

1. Les probabilités en physique quantique sont intrinsèques, il est impossible de s'en passer, même dans une théorie plus fondamentale encore. C'est par exemple le point de vue de Bohr. Dans ce cas, l'état mathématique qu'on manipule ordinairement décrit ce qui est connaissable aujourd'hui. Il sera éventuellement remanié par une expérience nouvelle, mais son statut restera toujours le même, les probabilités seront toujours présentes *fondamentalement*.
2. Les probabilités ne sont pas intrinsèques, elles émergent d'un manque de connaissance de notre part. C'est par exemple le point de vue d'Einstein, de de Broglie, et de Bohm (la mécanique quantique est incomplète). Dans ce cas, il faut adjoindre à l'état mathématique actuel une autre entité, qui renferme en elle ce comportement probabiliste, et qui l'explique. Comme nous l'avons déjà vu, plusieurs tentatives ont été proposées : les ondes pilotes, les variables cachées locales ou non locales. . . Certaines de ces théories sont déjà expérimentalement réfutées. Pour l'instant, l'entité mathématique nouvelle à considérer n'apporte pas plus de renseignement que la mécanique quantique ordinaire, puisqu'à l'heure actuelle toutes les connaissances (empiriques) que nous avons d'un objet quantique sont déjà contenues dans l'état usuel ! En d'autres termes, ces variables seraient si bien cachées qu'on n'a pas encore trouvé le moyen de les caractériser expérimentalement ! Ces nouvelles théories risquent de plus de se heurter à des problèmes techniques incontournables : c'est ce qui est arrivé par exemple à la notion d'onde pilote si on veut la rendre compatible avec les nouvelles expériences mettant en jeu la multisimultanéité (la nouvelle théorie bâtie à cet effet ayant été réfutée elle aussi !). Ces théories sont plus compliquées, donc plus fragiles face aux nouvelles expériences. Un espoir est de voir apparaître une nouvelle théorie profondément novatrice, qui expliquerait de façon

⁹Pour des systèmes en équilibre seulement !

élégante les probabilités.

Aujourd'hui, rien ne permet de favoriser une hypothèse plutôt qu'une autre.

2.4. Les développements théoriques récents

Il existe aujourd'hui un renouveau théorique à propos du problème de l'interprétation de la mécanique quantique [1]. Depuis une vingtaine d'années, des progrès conceptuels ont pu être obtenus, qui donnent en particulier une vision un peu plus fine du processus de la mesure. Tous ces travaux ont pour but de comprendre la mécanique quantique en restant strictement dans son formalisme (en utilisant en réalité un formalisme équivalent : la théorie des histoires). À aucun moment il n'est fait appel à la physique classique, en particulier la dynamique ne repose que sur l'équation de Schrödinger.

Les progrès obtenus portent d'abord sur la *dérivation des lois de la physique classique* à partir de la mécanique quantique, et en particulier de l'émergence du déterminisme absolu classique à partir du probabilisme quantique. Il est en effet possible de réconcilier ces extrêmes en acceptant que le déterminisme soit valable avec une probabilité d'erreur si petite dans les conditions ordinaires des expériences, qu'il est impossible de jamais les constater. Ces probabilités d'erreur sont en effet calculables, et d'un ordre de grandeur extrêmement faible. Le déterminisme prend donc un sens probabiliste. . . Il est aussi possible de dire à l'avance si un système aura un comportement classique ou quantique. Aujourd'hui, une nouvelle physique est en train de naître, le *mésoscopique*. Elle s'intéresse à des situations physiques comprises entre le microscopique (quantique) et le macroscopique (classique), en ne s'occupant que d'un nombre limité de degrés de liberté (quelques dizaines, voire centaines). Dans ces situations, il est difficile de dire si le système décrit est quantique ou classique (on parle souvent de situations « semi-classiques »). Les développements théoriques récents sur la mécanique quantique arrivent à point nommé pour encadrer les formidables avancées expérimentales dans ce domaine ! L'ensemble de ces travaux théoriques donnent aussi un cadre très formel aux deux principes énoncés très vaguement par Bohr : le principe de correspondance d'une part (le passage du quantique au classique) et le principe de complémentarité d'autre part (ces travaux expliquent pourquoi certaines représentations sont incompatibles dans le cadre d'une expérience donnée).

La seconde avancée majeure concerne la *décohérence*, dans ses aspects aussi bien théorique qu'expérimental. Le processus de mesure a en effet été décomposé en deux phases : la *décohérence* et l'*objectification*. La décohérence est le phénomène qui

permet de faire disparaître à l'échelle macroscopique les *interférences quantiques*. Par exemple, dans la dynamique jusqu'alors proposée pour l'expérience du chat de Schrödinger, l'état final est une superposition de nombreux états possibles, dont certains décrivent le chat mort et d'autres le chat vivant. Ces états interfèrent entre eux, en un sens mathématique assez compliqué, alors que les états classiques (chat mort ou chat vivant) sont eux bien séparés. Or, en prenant en compte la modélisation complète de l'expérience, en y incluant le système étudié, mais aussi l'appareil de mesure et l'environnement, il est possible de montrer que l'état final est une superposition d'états qui *n'interfèrent plus*.¹⁰ On pourrait abusivement résumer ce processus en disant qu'on passe d'un état « chat mort *et* vivant » à un état « chat mort *ou* vivant. » Cette décohérence a sa propre dynamique (irréversible), donnée par les lois de la physique quantique, dont les *temps caractéristiques sont extrêmement courts* : en d'autres termes, cet effet est quasi instantané. Il se trouve néanmoins qu'il a été possible de monter une expérience dans laquelle ce temps assez long pour qu'on puisse observer *en direct* cette décohérence ! [5] La théorie a ainsi pu être confirmée. La décohérence repose sur l'idée que les degrés de liberté « classiques » (les variables pertinentes qui seront directement reliées aux résultats de la mesure, par exemple l'angle que fait l'aiguille sur un cadran, ou bien la position d'un électron lorsqu'il percute un écran) sont un sous-ensemble (très petit !) de tous les degrés de liberté quantique intervenant dans une mesure : ceux du système étudié bien sûr, mais aussi ceux de l'appareil de mesure lui-même (dont nous avons vu qu'ils pouvaient se compter en milliards de milliards !), et même ceux de l'environnement (air, lumière ambiante, . . .). Les degrés de liberté « en trop » sont moyennés d'une certaine façon dans ce modèle de la décohérence, puisqu'ils ne sont pas « visibles » à l'échelle classique. La conséquence immédiate est que si le système interagit avec un environnement qui a peu de degrés de liberté, alors la décohérence n'a pas lieu ! C'est bien ce qui se passe pour un système vraiment isolé. C'est aussi ce qui se passe dans l'expérience des fentes d'Young, où la décohérence n'a pas lieu au niveau des fentes, puisque des figures d'interférences sont obtenues sur l'écran (au niveau de l'écran, la décohérence a lieu, puisqu'une seule position est sélectionnée !). Par contre, un appareil de mesure « normal » a beaucoup de degrés de liberté internes, et c'est pourquoi la décohérence a lieu lors d'une mesure. Ainsi, dans l'expérience du chat de Schrödinger, elle se manifeste dès l'appareil de détection de la désintégration. La décohérence a lieu plus généralement lorsqu'un système quantique interagit avec un autre

¹⁰En termes mathématiques, on dit que les états sont « orthogonaux. »

système quantique contenant *beaucoup* de degrés de liberté internes : il n'y a donc plus lieu de particulariser l'appareil de mesure et l'acte de mesure. Le modèle de la décohérence conduit à l'*interprétation probabiliste* des résultats d'une mesure. Il *démontre* sur ce point l'essentiel des règles empiriques données autour de la mesure (et que l'interprétation de Copenhague avait à l'époque érigées en postulats), tout en restant strictement dans le cadre de la physique quantique. Enfin, il répond à la question de la frontière entre le quantique et le classique : on sait désormais dans une expérience donnée ce qui peut être considéré comme « classique. »

L'autre étape du processus de mesure est l'*objectification*. Après la décohérence, l'état quantique est encore une *superposition* d'états « décorrés. »¹¹ Cependant, la réalité « classique » est *unique* : un seul de ces états est présent après la mesure. L'objectification est l'acte qui donne un résultat *unique* (parmi tous les résultats possibles) à la mesure, en réduisant la fonction d'onde à l'un de ces états possibles. C'est le choix au hasard d'un état plutôt que d'un autre dans la superposition d'états « décorrés. » C'est la partie la plus problématique de la réduction de la fonction d'onde. Aucune théorie n'est pour l'instant capable d'expliquer cet effet aléatoire : l'objectification reste donc *aujourd'hui* un postulat (c'est-à-dire un énoncé non démontré, mais vérifié par l'expérience).

3. Conclusion

Malgré ses succès, la mécanique quantique pose donc encore de nombreux problèmes de fond. Malheureusement, certaines barrières mathématiques infranchissables (dans le cadre mathématique actuel) font craindre le pire : il est possible que le processus d'objectification ne soit jamais expliqué dans ce formalisme. Certains physiciens s'en accommodent, en faisant remarquer par exemple que le problème de l'unicité de la réalité est aussi posé en physique classique, et que peut-être ce ne sera jamais une *conséquence* de la théorie (quelle qu'elle soit). Ce point de vue n'est pas satisfaisant pour la raison que la physique quantique, contrairement à la physique classique, crée de la « multiplicité » dans sa dynamique. Il serait donc normal qu'elle explique ensuite le retour à l'unicité. Plus grave encore, la physique quantique ne peut pas être *la* théorie ultime dont les physiciens rêvent. En effet, cette théorie fait l'impasse sur l'autre grande révolution du XX^{ème} siècle, la relativité générale. Aucune théorie jusqu'à présent ne peut prétendre unifier ces deux branches de la physique (même si certains physiciens prétendent le faire par des théories hautement

spéculatives!). Il se peut donc que tous ces problèmes d'interprétation prennent un sens évident dans une future théorie. Ainsi, le statut du hasard quantique pourrait peut-être être reconsidéré un jour. Gardons à l'esprit les échelles de temps de la connaissance humaine : il a fallu près de 300 ans de recul pour dépasser la physique classique de Newton. Aujourd'hui, la physique quantique n'a que 100 ans !

Références

- [1] Omnès Roland, Comprendre la mécanique quantique, EDP Sciences, 2000.
- [2] Banesh Hoffman, Michel Paty, L'étrange histoire des quanta, Seuil, 1981.
- [3] Aspect, Dalibard, Roger, *Physical Review Letter*, Vol 49, p. 1804, 1982.
- [4] Zbinden, Brendel, Gisin, Tittel, *Physical review A* 63, p. 831, 2000.
- [5] Brune, Hagley, Dreyer, Maître, Maali, Wunderlich, Raimond, Haroche, *Physical Review Letter*, Vol 77, p. 4887, 1996.
- [6] Lurçat François, Ontologie quantique selon Niels Bohr, IIIe Congrès International d'Ontologie, Saint-Sébastien, Octobre 1998.
- [7] Lévy-Leblond, Balibar, Quantique, Rudiments, CNRS InterEditions, 1984.

¹¹qui n'interfèrent plus entre eux, donc « orthogonaux. »